

DOI: 10.20103/j.stxb.202406231453

李欣怡, 向建军, 李永飞, 李蓓蓓, 夏仕榕, 谷雨, 廖博儒, 廖艳艳. 湖南八大公山表土孢粉组合及其植被指示意义. 生态学报, 2025, 45(9): 4470-4488.

Li X Y, Xiang J J, Li Y F, Li B B, Xia S R, Gu Y, Liao B R, Liao Y Y. Surface pollen assemblages and their vegetation indicating significance in Badagong Mountains, Hunan Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(9): 4470-4488.

湖南八大公山表土孢粉组合及其植被指示意义

李欣怡¹, 向建军², 李永飞^{1,*}, 李蓓蓓³, 夏仕榕¹, 谷 雨⁴, 廖博儒⁵, 廖艳艳¹

1 吉首大学生态旅游湖南省重点实验室, 张家界 427000

2 八大公山国家级自然保护区管理处, 桑植 427100

3 南京信息工程大学科技史与气象文明研究院, 南京 210044

4 张家界学院, 张家界 427000

5 吉首大学土木工程与建筑学院, 张家界 427000

摘要:八大公山国家级自然保护区地处我国中亚热带北部中山山地, 现存有比较完整的亮叶水青冈和多脉青冈原始次生林, 基于该区 42 个样点的表土孢粉数据, 探讨不同植物群落的孢粉组合特征及其对母体植被的指示意义。结果发现: (1) 孢粉组合中木本植物花粉占绝对优势, 木本植物花粉 (Arboreal Pollen) 与非木本植物花粉 (Nonarboreal Pollen) 比值 (AP/NAP) 约 7.6, 孢粉浓度 137122 粒/g; (2) 白辛树、黄柏及 5 种珍稀植物群落的花粉组合未能反映母体植物群落的组成特征, 沼泽、灌丛/灌木林和野生板栗林花粉组合能部分反映母体植物群落的组成特征, 亮叶水青冈林和青冈林花粉组合能较好反映母体植物群落的主要组成特征; (3) 聚类分析及降趋势对应分析 (Detrended correspondence analysis, DCA) 结果显示, 孢粉百分含量能较好地区分沼泽、水马桑灌丛、鹅耳枥灌木林和阔叶林, 水马桑灌丛、鹅耳枥灌木林和杜鹃灌木林之间可以区分, 但杜鹃灌木林、亮叶水青冈林和青冈林分布较为集中, 较难区分; (4) 主要花粉类型中松属、桉木属、桦木属、落叶栎类等呈超代表性, 青冈-常绿栎类花粉代表性适中, 水青冈属、禾本科花粉呈低代表性; (5) 植物多样性指数和外来超代表性花粉对群落优势种花粉含量有较强干扰作用, 亮叶水青冈花粉在纯林含量可达 40%, 其优势群落中其他优势种花粉代表性也能较大地影响其花粉含量; (6) 青冈属和常绿栎类花粉形态结构非常相似, 鉴定区分困难, 孢粉鉴定时宜将两者归并为青冈-常绿栎类花粉进行分析。本研究可为亚热带山地群落演替与环境重建研究提供基础资料与理论支持, 为植被恢复和生态保护提供实践参考。

关键词:八大公山; 表土孢粉; 孢粉组合; 植物群落; 降趋势对应分析

Surface pollen assemblages and their vegetation indicating significance in Badagong Mountains, Hunan Province, China

LI Xinyi¹, XIANG Jianjun², LI Yongfei^{1,*}, LI Beibei³, XIA Shirong¹, GU Yu⁴, LIAO Boru⁵, LIAO Yanyan¹

1 Hunan Provincial Key Laboratory of Ecological Tourism, Jishou University, Zhangjiajie 427000, China

2 Administration Bureau of Badagongshan National Nature Reserve, Sangzhi 427100, China

3 Institute of Science and Technology History and Meteorological Civilization, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

4 Zhangjiajie College, Zhangjiajie 427000, China

5 School of Civil Engineering & Architecture, Jishou University, Zhangjiajie 427000, China

Abstract: Spores and pollen are among the crucial proxy indicators in the research of global change and environmental evolution. The pollen of different plants is influenced by multiple aspects, such as its own production, dispersal,

基金项目:国家自然科学基金 (42067061, 41972193); 湖南省教育厅科学研究重点项目 (24A0368); 湖南省自然科学基金面上项目 (2025JJ50197)

收稿日期:2024-06-23; **网络出版日期:**2025-03-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyfei_123@163.com

transportation, source range, deposition, preservation, and the external environment. Consequently, the relationship between pollen and vegetation is not a simple linear one. This has been a long-standing problem that palynology has been striving to solve. Badagong Mountain National Nature Reserve, located in the mid-mountain region of northern mid-subtropical China, features relatively pristine primary and secondary forests, predominantly composed of *Fagus lucida* and *Quercus multinervis*. Utilizing surface pollen data obtained from 42 sampling points within the reserve, we investigated the characteristics of pollen assemblages across various plant communities and their relevance as proxies for the parent vegetation. The primary findings indicated that arboreal pollen predominated in the pollen assemblages, with an arboreal to nonarboreal pollen (AP/NAP) ratio of approximately 7.6 and a pollen concentration of 137,122 grains per gram. Pollen assemblages from *Pterostyrax psilophyllus*, *Phellodendron chinense*, and five rare plant communities did not accurately mirror their respective local plant communities. Pollen assemblages from swamps, shrub/shrub forests, and wild *Castanea mollissima* forests were partially congruent with the composition of their respective plant communities, while those from *Quercus glauca* forests and *Fagus lucida* forests closely matched the dominant composition of their parent plant communities. The results of cluster analysis and detrended correspondence analysis (DCA) showed that swamp, *Weigela japonica* scrub, *Carpinus turczaninowii* shrubbery, and broadleaf forest could be well distinguished by pollen spectra; *Weigela japonica* scrub, *Carpinus turczaninowii* shrubbery, and *Rhododendron* shrubbery could be distinguished from each other, while the distribution of *Rhododendron* shrubbery, *Quercus glauca* forest, and *Fagus lucida* forest were more concentrated and not accurately represented by their pollen spectra. Among the main pollen taxa, *Pinus*, *Alnus*, *Betula*, and deciduous *Quercus* were over-represented, *Cyclobalanopsis-evergreen Quercus* were moderately representative, and *Fagus* and Poaceae were under-represented. Plant diversity index and exotic over-represented pollen strongly interfered with the pollen content of dominant species in the community. The pollen content of *Fagus lucida* in the pure forest could reach up to 40%, yet it was also influenced by the pollen representation of other dominant species within the co-dominant community. The pollen morphology of *Cyclobalanopsis* and evergreen *Quercus* species is very similar, making it difficult to identify and differentiate them. It is advisable to group them as *Cyclobalanopsis-evergreen Quercus* for analysis in palynological identification. This study can provide basic data and theoretical support for the study of community succession and environmental reconstruction in subtropical mountainous areas, and provide practical reference for vegetation restoration and ecological protection.

Key Words: Badagong Mountains; surface pollen; pollen assemblages; plant communities; detrended correspondence analysis

孢粉是全球变化与环境演变研究的重要代用指标之一,其有助于探讨地层对比、植物演替、气候变迁等科学问题,目前受到学者广泛关注^[1]。基于花粉资料重建关键区域的古植被与古气候是当今第四纪环境研究的主要内容之一,现代花粉与植被之间关系的正确理解为其提供了重要基础^[2]。由于不同植物的花粉受到自身产量、传播、搬运、来源范围、沉积、保存以及外部环境等多方面影响,使得花粉与植被之间并非简单线性关系,花粉的相对含量与其母体植物在群落中比例并不一一对应,从而降低了孢粉分析在古植被重建中准确性,这也是孢粉学长期以来意欲解决的难题^[3-4]。近年来,国际上孢粉学者利用地层中孢粉化石重建地质历史时期植被与气候,成果丰硕,Trachsel 等^[5]运用 STEPPS 和 REVEALS 模型对美国东北部前欧洲定居时代植被进行重建比较,Vignola 等^[6]根据古代勒纳湖的花粉记录推断出青铜时代早期开始覆盖 5000 年的阿尔戈平原(希腊伯罗奔尼撒半岛)植被的高分辨率重建;国内孢粉工作者一直致力于现代花粉与植被关系的研究,在东北^[7-8]、华北^[9-10]、西北^[11-12]、青藏高原^[13-14]、西南^[15]、华东^[16-17]、华中^[18-19]及华南^[20-21]等地区取得了重要进展,但针对我国中亚热带北部湖南山地第四纪孢粉研究仍存在地理间隙^[22]。我国亚热带森林在全球森林生态系统中占据独特地位^[23],由于人类活动长期干扰,森林遭受破坏,一定程度上影响了对亚热带地区孢粉类型的鉴定,加强该区现代孢粉及其植被指示性的研究受到孢粉工作者重要关注。

八大公山位于中国具有国际意义的生物多样性关键地区之一——川鄂湘黔边界山区,地处中国种子植物特有属川东-鄂西分布中心(孑遗中心)和中国特有植物的环形地带(川东、鄂西南、湘西北和黔东北),现保存有湖南省中山山地面积最大、类型最多的原始次生林,是一处极为珍贵的植物宝库,也是武陵山脉植被保存最完整的区域之一,现有高等植物 177 科 852 属 2160 种^[24-25]。其中,八大公山亮叶水青冈林及植物区系是华中植物区最具代表性的森林群落和区系,生物资源稀有性、物种组成丰富性、起源古老及特有性,使得该区域具有十分重要的学术价值及保护意义,为孢粉研究提供良好基础^[26-27]。因此,通过对 42 个代表性植物群落表土孢粉样品开展分析,理清八大公山代表性植物类群孢粉组合特征及其植被指示意义,是探讨该区域古植被演替规律及植物种类迁移演替过程的重要数据,以期为亚热带中山山地及相似地区开展群落演替、环境重建、生态保护等提供基础资料和参考依据。

1 研究区概况

八大公山国家级自然保护区位于湖南省张家界市桑植北部,地处武陵山脉北端,介于 29°39'18"—29°49'48" N, 109°41'50"—110°09'50" E 之间,由斗蓬山、杉木界和天平山 3 个林区组成,总面积 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$;属扬子准地台上八面山褶皱带,是新华夏系构造与东西向构造的联合复合,地层主要分布沉积岩和部分沉积变质岩;地势起伏显著,呈东西向脉状中山构成境内地貌基本骨架,海拔一般在 1000 m 以上,最高峰为斗蓬山主峰 1890.4 m,最低点为阳思庙下楠木坪与黄连台沟汇流处 395 m;属亚热带山地季风湿润气候,年均气温 11.5℃,1 月平均气温 0.1℃,7 月平均气温 22.8℃,极端最低温度 -10—-15℃,年降水量 2105.4 mm,雨日 176 d,年蒸发量 400 mm 左右,全年相对湿度 90% 以上;由山麓至山顶主要有黄红壤、黄壤、黄棕壤、石灰土和山地沼泽土等;受区域自然地理条件和人类活动影响,植被垂直地带性不显著,主要植被类型有:常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、灌丛/灌木林和沼泽等^[28](图 1—2)。

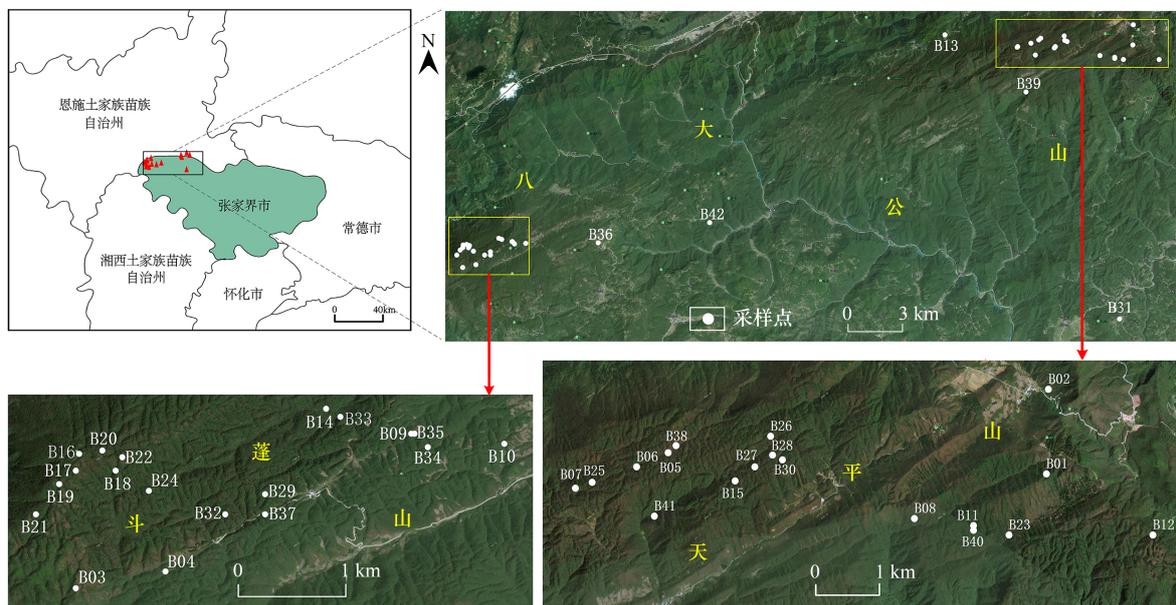


图 1 研究区和采样点示意图

Fig.1 Schematic diagram of study area and sampling sites

采样点 B:八大公山缩写

常绿阔叶林主要分布于海拔约 600—1600 m 之间,乔木层主要以栎属 (*Quercus*)、水青冈属 (*Fagus*)、樟属 (*Cinnamomum*)、润楠属 (*Machilus*)、木姜子属 (*Litsea*)、花楸属 (*Sorbus*)、李属 (*Prunus*)、木荷属 (*Schima*) 等为优势科属,郁闭度较大,约 0.7—0.8;林下灌木以杜鹃花科 (*Ericaceae*)、樟科 (*Lauraceae*)、山茶

科 (Theaceae)、山矾科 (Symplocaceae) 为主; 草本植物主要见春兰 (*Cymbidium goeringii*)、箭竹 (*Fargesia spathacea*)、冷箭竹 (*Arundinaria fabri*)。常绿落叶阔叶混交林主要分布于海拔约 1300—1700 m 之间, 乔木层种类较为丰富, 常绿阔叶树以细叶青冈 (*Q. shennongii*) 和多脉青冈 (*Q. multinervis*) 为优势树种; 落叶阔叶树以亮叶水青冈 (*F. lucida*)、中华五加 (*Chengiopanax fargesii*)、蓝果树 (*Nyssa sinensis*) 和七叶树 (*Aesculus chinensis*) 占优势, 郁闭度约 0.65—0.83; 灌木层以金山杜鹃 (*Rhododendron longipes*)、云锦杜鹃 (*R. fortunei*)、粤中八角 (*Illicium tsangii*)、四照花 (*Cornus kousa*)、连蕊茶 (*Camellia fraterna*) 为主; 草本层主要见箭竹、冷箭竹。落叶阔叶林主要分布于海拔约 1200—1800 m 之间, 乔木层落叶树种以亮叶水青冈、连香树 (*Cercidiphyllum japonicum*)、灯台树 (*Cornus controversa*)、珙桐 (*Davidia involucrata*)、板栗 (*Castanea mollissima*)、湖北枫杨 (*Pterocarya hupehensis*) 为优势种, 郁闭度约 0.6—0.75; 灌木层主要有金山杜鹃、灯笼花 (*Agapetes lacei*)、茶条果 (*Symplocos lucida*)、秤星树 (*Ilex asprella*)、西南山茶 (*C. pitardii*) 等; 草本层多见冷箭竹、莎草 (*Cyperus rotundus*) 和菊科 (Compositae)。

灌丛/灌木林主要分布于海拔约 1300—1600 m 之间, 优势种主要有水马桑 (*Weigela japonica*)、四川杜鹃 (*R. sutchuenense*)、长蕊杜鹃 (*R. stamineum*)、鹅耳枥 (*Carpinus turczaninowii*)、山柳 (*Salix pseudotangii*)、檀梨 (*Pyrularia edulis*)、木荷 (*S. superba*)、多脉青冈等, 覆盖度约 0.7—0.8。沼泽分布于海拔约 1400—1500 m 之间, 灌木多为蔷薇科 (Rosaceae)、漆树科 (Anacardiaceae)、忍冬科 (Caprifoliaceae), 草本层主要见禾本科 (Poaceae)、菊科及蕨类植物, 盖度约 0.65—0.8。栽培植被分布于海拔约 1100—1500 m 之间, 主要为人工种植的黄柏林 (*Phellodendron chinense*), 伴生多脉青冈、盐肤木、檫木、水马桑、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 等, 郁闭度约 0.6—0.7。



图 2 八大公山各植物群落景观

Fig.2 Landscape of various plant communities in Badagong Mountains

2 研究方法

样品采集。2021 年 7—8 月于八大公山自然保护区斗蓬山和天平山采集表土样品, 同时进行样方调查。由于八大公山植被分布有较强的斑块化特征, 本研究选择了具有代表意义的 9 个植物群落, 沿着调查线路对

每个群落采集约 2—10 个样点,每个样点依据梅花 5 点法获取地表凸面新鲜苔藓样品约 500 g。同时依据地势设置 42 个样方,包括 30 个森林样方面积为 10 m×10 m (或 5 m×15 m, 10 m×15 m, 10 m×20 m, 10 m×40 m, 15 m×15 m, 15 m×20 m, 20 m×20 m), 10 个灌丛/灌木林样方面积为 5 m×5 m (或 10 m×10 m, 10 m×15 m, 10 m×20 m, 20 m×20 m), 2 个沼泽样方面积为 5 m×5 m, 记录样方中胸径大于 5 cm 的乔灌木及其树高和冠幅,以及其他灌木和草本的种类,采用全球定位系统(GPS)确定样方的经度、纬度和海拔,各样点主要植物类型如表 1。

表 1 八大公山 42 个表土样点信息

Table 1 Information of 42 sampling sites in the Badagong Mountains

样号 Sample No.	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	海拔 Altitude/m	样方面积 Quadrat area/ (m×m)	植被类型 Vegetation type	群落类型 Coenotype	主要植物/株 Main plant
B01	110°7'20"	29°47'12"	1478	5×5	沼泽	沼泽	灌木:狭叶绣线菊、蛇莓;草本:拂子茅、荩草、百球蕨草、三脉紫菀、卵果蕨、紫萁
B02	110°7'21"	29°47'48"	1482	5×5	沼泽	沼泽	灌木:盐肤木、水马桑、蛇莓;草本:拂子茅、荩草、三脉紫菀、卵果蕨、紫萁
B03	109°44'30"	29°40'35"	1571	5×5	灌丛	水马桑灌丛	乔木:多脉青冈、盐肤木;灌木:水马桑、山矾、中华猕猴桃、宜昌木姜子、白檀、野桐、三桠乌药、榉木、卵果蔷薇、腊莲绣球;草本:珍珠菜、大叶知风草、莎草、芭茅、毛蕨、圆叶景天
B04	109°44'57"	29°40'40"	1557	10×10	灌丛	水马桑灌丛	乔木:红麸杨、盐肤木、灯台树;灌木:水马桑、秤星树、腊莲绣球、宜昌木姜子、中华猕猴桃、樱桃、猫儿屎、木通、柃木、崖爬藤;草本:黄金凤、冷箭竹、荩草、鸭跖草、苦苣菜、绞股蓝、半边旗
B05	110°4'8"	29°47'21"	1508	10×10	灌丛	水马桑灌丛	乔木:板栗、盐肤木、多脉青冈;灌木:水马桑、四照花、粉花绣线菊、白檀、猕猴桃;草本:红丝线、白茅草、天南星
B06	110°3'52"	29°47'15"	1493	10×10	灌木林	杜鹃灌木林	乔木:中华槭、黄丹木姜子、多脉青冈;灌木:四川杜鹃(17)、四照花(3)、西南山茶、绿叶甘藷、茶条果;草本:阔叶箬竹(90%)、楼梯草、冷水花、黄花油点草、毛蕨、钻地风
B07	110°3'24"	29°47'8"	1455	10×20	灌木林	杜鹃灌木林	乔木:亮叶水青冈、武当玉兰、中华槭;灌木:四川杜鹃(26)、四照花(2)、尖叶山茶、粤中八角、角翅卫矛;草本:毛蕨、箭竹
B08	110°6'13"	29°46'53"	1396	10×15	灌木林	杜鹃灌木林	乔木:亮叶水青冈(4)、红果钓樟(3)、黄丹木姜子(3)、多脉青冈(2)、曼青冈(2)、檫木(2)、地锦槭、香桦、铁山矾、林叶海桐;灌木:长蕊杜鹃(27)、连蕊茶(9)、茶条果(4)、小果南烛(3)、四照花(2)、齿缘吊钟花(2)、柃木、猫儿刺、树参、白檀;草本:阔叶麦冬、箬竹
B09	109°46'12"	29°41'21"	1453	10×15	灌木林	鹅耳枥灌木林	乔木:鹅耳枥(18)、多脉青冈(6)、灯台树(2)、石灰花楸、尼桑玉兰;灌木:山柳(19)、檀梨(6)、樱桃(3)、山樱桃、绿叶甘藷、红柄木樨;草本:海州常山
B10	109°46'39"	29°41'18"	1452	10×10	灌木林	鹅耳枥灌木林	乔木:鹅耳枥(13)、石灰花楸(4)、多脉青冈、华西花楸、檫木、宜昌润楠;灌木:檀梨(8)、大花卫矛(2)、香叶树(2)
B11	110°6'43"	29°46'50"	1400	20×20	灌木林	鹅耳枥灌木林	乔木:鹅耳枥(8)、木荷(6)、细叶青冈(6)、红果钓樟(3)、宜昌润楠(3)、香桦(2)、冬青(2)、白蜡树、薄叶山矾、檫木、灯台树、多脉青冈、黄丹木姜子、鸡爪槭、蓝果树、亮叶山矾、亮叶水青冈、红果钓樟、宜昌润楠、木荷、细叶青冈;灌木:柃木(3)、齿缘吊钟花(4)、山矾(3)、短柱柃(2)、长蕊杜鹃(2)、茶条果、杜鹃、连蕊茶、三桠乌药、柿子花、小果南烛、野鸦椿、马缨杜鹃、荚蒾、白檀、朱砂根、茵芋
B12	110°8'14"	29°46'46"	1379	10×20	灌木林	鹅耳枥灌木林	乔木:鹅耳枥(31)、多脉青冈(28)、宜昌润楠(2)、刺榛、亮叶水青冈、马尾松、曼青冈、中华槭、榕叶冬青;灌木:长蕊杜鹃(16)、大云锦杜鹃(7)、齿缘吊钟花(2)、四照花(2)、樱桃(2)、合轴荚蒾、三桠乌药、乌饭树、连蕊茶、杜鹃、蓂蕨
B13	110°56"	29°47'30"	1432	10×10	落叶阔叶林	白辛树林	乔木:白辛树(2)、灯台树(2)、巴东栎、多脉青冈、珙桐、水青树、兴山榆、黄丹木姜子、锈叶新木姜子;灌木:西南山茶、腊莲绣球、桦叶荚蒾、黑老虎;草本:鹿蹄草、莎草、菊科

续表

样号 Sample No.	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	海拔 Altitude/m	样方面积 Quadrat area/ (m×m)	植被类型 Vegetation type	群落类型 Coenotype	主要植物/株 Main plant
B14	109°45'44"	29°41'27"	1422	10×20	落叶阔叶林	白辛树林	乔木:白辛树(10)、连香树(6)、巴东栎、臭辣树、鹅掌楸、灰叶稠李、五裂槭、武当玉兰、兴山榆、长叶石栎、灯台树;灌木:野桐(3)、樱桃、圆锥绣球、棣棠花、西南山茶、中华猕猴桃、腊莲绣球;草本:冷箭竹
B15	110°4'42"	29°47'9"	1494	15×15	落叶阔叶林	白辛树+亮叶水青冈林	乔木:白辛树(4)、多脉青冈(5)、亮叶水青冈(3)、水青树(2)、红柴枝(2)、椴树、红花玉兰、中华槭;灌木:西南山茶(3)、茶条果、红果黄肉楠、绿叶甘柾、腊莲绣球、棣棠;草本:黄花油点草
B16	109°44'30"	29°41'10"	1781	20×20	落叶阔叶林	亮叶水青冈+杜鹃林	乔木:亮叶水青冈(28)、石灰花楸、五裂槭、多脉青冈;灌木:金山杜鹃(7)、四川杜鹃(2)、灯笼花、茶条果、合轴荚蒾;草本:鹿药、毛蕨、莎草、冷箭竹
B17	109°44'31"	29°41'15"	1767	20×20	落叶阔叶林	亮叶水青冈+杜鹃林	乔木:亮叶水青冈(35)、水榆花楸(2)、多脉青冈、五裂槭;灌木:金山杜鹃(31)、秤星树(4)、灯笼花(3)、合轴荚蒾;草本:冷箭竹
B18	109°44'38"	29°41'16"	1750	10×40	落叶阔叶林	亮叶水青冈+杜鹃林	乔木:亮叶水青冈(28)、五裂槭(2)、天目紫茎(2)、水榆花楸;灌木:金山杜鹃(22)、灯笼花(5)、秤星树(2)、茶条果;草本:冷箭竹
B19	109°44'25"	29°41'6"	1765	20×20	落叶阔叶林	亮叶水青冈林	乔木:亮叶水青冈(35)、多脉青冈(3)、五裂槭(3)、鹅耳枥、华西花楸;灌木:灯笼花(3)、茶条果(2)、菝葜;草本:冷箭竹
B20	109°44'44"	29°41'14"	1727	20×20	落叶阔叶林	亮叶水青冈林	乔木:亮叶水青冈(20);灌木:灯笼花;草本:冷箭竹
B21	109°44'18"	29°40'57"	1720	20×20	落叶阔叶林	亮叶水青冈林	乔木:亮叶水青冈(36)、多脉青冈(5)、新木姜子、亮叶冬青;灌木:灯笼花、宜昌木姜子、菝葜;草本:冷箭竹、莎草
B22	109°44'42"	29°41'10"	1697	10×20	常绿落叶阔叶混交林	亮叶水青冈+多脉青冈林	乔木:亮叶水青冈(8)、多脉青冈(7)、小叶青冈、水榆花楸、华西花楸、红豆杉、黄丹木姜子;灌木:金山杜鹃、合轴荚蒾、红果树;草本:冷箭竹
B23	110°7'1"	29°46'46"	1306	20×20	常绿落叶阔叶混交林	亮叶水青冈+多脉青冈林	乔木:亮叶水青冈(22)、多脉青冈(11)、灯台树(2)、中华石楠(2)、板栗、薄叶山矾、红果钓樟、鸡爪槭、香桦;灌木:四照花(7)、四川杜鹃(3)、绿叶甘柾(2)、异叶榕(2)、白檀、齿缘吊钟花、短柱柃、三桠乌药、野茉莉、云锦杜鹃、菝葜、椴果海桐、常春藤、日本绣线菊;草本:山麦冬、箬竹、荩草、山酢浆草
B24	109°44'52"	29°41'4"	1644	10×20	常绿落叶阔叶混交林	多脉青冈+金山杜鹃林	乔木:多脉青冈(33)、亮叶水青冈(5)、黄丹木姜子(9)、灰叶稠李(4)、华西花楸(4)、巴东栎(3)、白辛树、鹅耳枥、五裂槭;灌木:金山杜鹃(11)、茶条果(3)、清香木姜子(3)、三桠乌药(4)、格药柃、合轴荚蒾、山矾;草本:冷箭竹
B25	110°3'25"	29°47'9"	1546	15×15	常绿落叶阔叶混交林	多脉青冈+云锦杜鹃林	乔木:多脉青冈(5)、石灰花楸(5)、亮叶水青冈、鹅耳枥、细叶青冈;灌木:云锦杜鹃(13)、柃木(5)、三桠乌药、乌饭树、新木姜子、粤中八角、齿缘吊钟花
B26	110°5'0"	29°47'28"	1529	10×20	常绿落叶阔叶混交林	青冈+粤中八角林	乔木:多脉青冈(4)、檫木(4)、香桦(2)、板栗(3)、亮叶水青冈、石灰花楸;灌木:粤中八角(4)、三桠乌药(3)、秤星树、茶条果、樱桃、山柳;草本:箭竹
B27	110°4'42"	29°47'9"	1529	10×15	常绿落叶阔叶混交林	青冈+中华五加林	乔木:细叶青冈(24)、多脉青冈(8)、中华五加(7)、亮叶水青冈(6)、野漆树(3)、薄叶山矾(2)、巴东栎、阔叶山矾、蓝果树、宜昌润楠、黄丹木姜子、大叶冬青;灌木:茶条果、粤中八角、鹿蹄草
B28	110°5'1"	29°47'20"	1517	15×15	常绿落叶阔叶混交林	青冈+中华五加林	乔木:多脉青冈(7)、中华五加(5)、亮叶水青冈(3)、黄丹木姜子(2)、板栗、檫木、椴树、华西花楸、石灰花楸、天目紫茎、宜昌润楠、中华槭、中华五加;灌木:樱桃(2)、灯笼花(2)、巴东栎、茶条果、稠李、山胡椒、四川杜鹃、粤中八角(多)、连蕊茶

续表

样号 Sample No.	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	海拔 Altitude/m	样方面积 Quadrat area/ (m×m)	植被类型 Vegetation type	群落类型 Coenotype	主要植物/株 Main plant
B29	109°45'27"	29°41'3"	1599	10×20	常绿阔叶林	多脉青冈+细叶青冈林	乔木:多脉青冈(24)、细叶青冈(21)、亮叶水青冈(4)、宜昌润楠(6)、木荷(6)、鹅耳枥(5)、巴东栎(2)、红果钓樟(2)、灰叶稠李(2)、石灰花楸(2)、铁青树(2)、大叶冬青、椴树、黄丹木姜子、香榧叶、中华槭;灌木:清香木姜子(2)、翅铃、大花卫矛、三桠乌药、山矾、长毛柃;草本:春兰、箭竹
B30	110°5'6"	29°47'18"	1517	15×15	常绿落叶阔叶混交林	多脉青冈+亮叶水青冈林	乔木:亮叶水青冈(9)、多脉青冈(8)、板栗(3)、阔叶山矾(4)、石灰花楸(4)、薄叶山矾(3)、黄丹木姜子(3)、鹅耳枥(2)、宜昌润楠(2)、檫木、红果钓樟、香榧、中华槭、中华五加、大叶冬青;灌木:齿缘吊钟花(5)、白檀(3)、茶条果(3)、柃木(3)、新木姜子(3)、四照花、粤中八角
B31	110°6'53"	29°39'3"	1535	15×15	常绿阔叶林	细叶青冈林	乔木:细叶青冈(多)、亮叶水青冈、巴东栎、石灰花楸、多脉青冈、板栗、香榧
B32	109°45'15"	29°40'57"	1469	20×20	常绿阔叶林	多脉青冈+翅铃林	乔木:多脉青冈(43)、小叶青冈(7)、木荷(8)、鹅耳枥(6)、黄丹木姜子(6)、板栗(3)、白辛树(3)、亮叶水青冈(2)、青榨槭(2)、石灰花楸(2)、宜昌润楠(2)、灯台树、灰叶稠李、香榧;灌木:翅铃(14)、三桠乌药(2)、格药柃、野鸦椿、茶条果(2)
B33	109°45'50"	29°41'25"	1440	10×10	常绿阔叶林	多脉青冈+四川杜鹃林	乔木:多脉青冈(15)、亮叶水青冈(4)、青榨槭(4)、黄丹木姜子、五裂槭、武当玉兰、新木姜子、西南山茶、香榧、野漆树;灌木:四川杜鹃(14)、灯笼花(15)、南烛(11)、白檀(3)、柃木(2)、茶条果、格药柃、合轴荚蒾、红果树、马醉木、野鸦椿、尖叶山茶、毒漆藤;草本:冷箭竹
B34	109°46'16"	29°41'17"	1456	10×10	栽培植被	黄柏林	乔木:黄柏、多脉青冈、檫木、五裂槭、板栗、盐肤木、野漆树、灯台树;灌木:水马桑、野桐、白檀、腊莲绣球、桑、冷箭荚蒾
B35	109°46'11"	29°41'21"	1456	5×5	栽培植被	黄柏林	乔木:黄柏、多脉青冈、盐肤木;灌木:美味猕猴桃;草本:珍珠菜、蕨、飞蓬、白茅草
B36	109°49'7"	29°41'19"	1185	10×10	栽培植被	黄柏林	乔木:黄柏
B37	109°45'27"	29°40'57"	1515	10×10	落叶阔叶林	珙桐林	乔木:珙桐(7)、多脉青冈(4)、灰叶稠李、白辛树、板栗、檫木、香榧;灌木:腊莲绣球、水马桑、野桐、猕猴桃、榉木、空心泡;草本:凤仙花
B38	110°4'12"	29°47'24"	1505	10×10	落叶阔叶林	野生板栗林	乔木:板栗(21)、多脉青冈、亮叶水青冈、石灰花楸、华西花楸、湖北海棠;灌木:三桠乌药(3)、刺叶冬青(2)、中华石楠、荚蒾、水马桑、中华猕猴桃、茶荚蒾、四照花、三叶木通、白檀、日本绣线菊、巴东栎;草本:紫萁、莎草
B39	110°3'42"	29°45'48"	1210	5×15	落叶阔叶林	湖北枫杨林	乔木:湖北枫杨(10)、野核桃(3)、稠李(2)、多脉青冈、香榧、香果树、银鹊树、中国旌节花、簇叶新木姜子、全缘叶稠李;灌木:华桑(4)、八角枫、长毛八角枫、腊莲绣球、野桐、大果卫矛、茶藨子、白筋、刺五加;草本:灯台莲、冷水花(多)、虎耳草、凤仙花、白接骨草、凤丫蕨、伞形科、独活、红丝线、鹿藿、大叶金腰、吉祥草、降龙草、野牛膝、绞股蓝
B40	110°6'43"	29°46'48"	1379	10×10	常绿落叶阔叶混交林	蓝果树林	乔木:蓝果树(5)、多脉青冈(4)、红果钓樟(3)、石灰花楸(3)、板栗、木姜子、锥栗;灌木:四照花(4)、山矾(3)、小果南烛(3)、长蕊杜鹃(3)、茶条果(2)、椴果吊樟(2)、满山红(2)、西南山茶(2)、三桠乌药、山柳、柃木、猫儿刺、胡颓子、朱砂根、寒莓;草本:莎草
B41	110°4'1"	29°46'54"	1302	15×15	常绿落叶阔叶混交林	七叶树林	乔木:七叶树(7)、多脉青冈(3)、亮叶水青冈、地锦槭、鹅耳枥、珙桐、鸡爪槭、宜昌润楠、长毛八角枫、绢毛稠李;灌木:连蕊茶(20)、瓜子黄杨、桃叶珊瑚;草本:白接骨草、降龙草、冷水花、楼梯草
B42	109°52'55"	29°41'55"	605	20×20	常绿阔叶林	小花木荷林	乔木:小花木荷(41)、马尾松、红麸杨、朴树、武陵苦丁茶、榉木、灯台树、山桐子、黄心夜合、香叶子、野漆树;灌木:小构、水麻、构树、腊莲绣球、大叶白纸扇、异叶榕、鹅掌柴、刺异叶花椒、齿叶铁仔、树参、雀梅藤、翼梗五味子、中华五味子、华清香藤、香叶树、飞龙掌血、勾儿茶;草本:穗芹、淡雅枸杞、芭茅、铁芒萁、淡竹叶

样号 B:八大公山 Badagong Mountain

实验分析。实验样品采用常规的氢氟酸 HF 法处理^[29],称取 5—15 g 样品,加入 1 片石松孢子 ((27637±56)粒)计算孢粉浓度,去除样品中碳酸盐、硅酸盐和腐殖质等,然后在超声波振荡器中用 10 μm 筛网富集孢粉,最后加入甘油保存,待制片鉴定。孢粉鉴定和统计参照《中国热带亚热带被子植物花粉形态》^[30]、《中国植物花粉形态》^[31]和《中国第四纪孢粉图鉴》^[32]等植物花粉形态书刊,在德国 Zeiss 生物显微镜下完成。每个样品统计孢粉 307—1186 粒,平均 574 粒。

数据处理。孢粉百分含量计算是以陆生种子植物花粉总和为基数,统计各孢粉所占百分比,采用 Tilia 软件处理孢粉数据,利用 CONISS 程序进行聚类,绘制孢粉图谱^[33]。孢粉浓度计算式为:某一孢粉类型的重量浓度(粒/g)=(鉴定的孢粉总数×加入的石松孢子数)/(统计的石松孢子数×样品质量(g))。Canoco 软件常用于生态学中约束与非约束排序分析,可洞悉植物、植物群落和生物群落结构及它们之间的环境联系^[34]。本文运用 Canoco 5.0 进行 DCA,对八大公山自然保护区表土孢粉结果进行统计和排序。

3 结果与分析

3.1 孢粉组合与浓度特征

八大公山国家级自然保护区 42 个表土孢粉样品共鉴定出 127 科(属),其中乔木 38 科(属),灌木 44 科(属),草本植物 30 科(属)、蕨类孢子 15 科(属)。乔木花粉主要有柏科/杉科、松属、青冈属、栲属/柯属、常绿栎类、落叶栎类、水青冈属、栗属、桤木属、桦木属、桑属等;灌木花粉主要见蔷薇科、榛属/鹅耳枥属、大戟科、蜡瓣花属、杜鹃花科、花椒属、胡椒属、盐肤木属等;陆生草本植物花粉主要见禾本科、藜科、蒿属等;水生草本植物花粉可见香蒲属、鸭跖草属;蕨类孢子主要有水龙骨科、石苇属、金星蕨科、里白属等(图 3—5)。

所有表土孢粉组合中木本植物花粉百分含量(69.2%—96.2%)占绝对优势,平均为 88.4%(见图 3),其

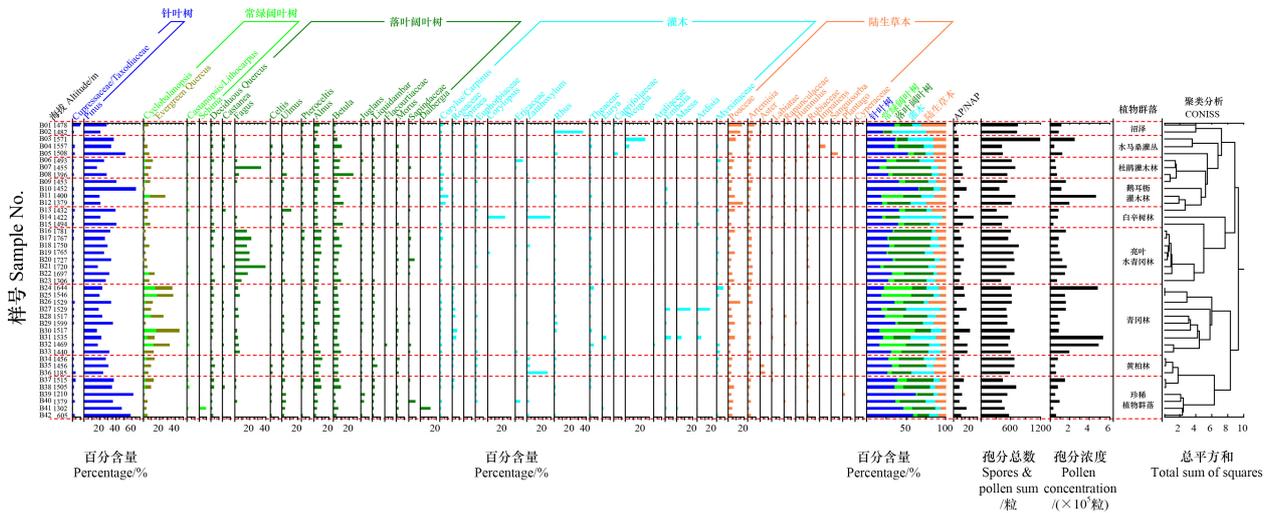


图 3 八大公山表土孢粉百分图谱及聚类分析示意图

Fig.3 Pollen percentage diagram and cluster analysis of the surface samples from Badagong Mountains

Cupressaceae/Taxodiaceae: 柏科/杉科; *Pinus*: 松属; *Cyclobalanopsis*: 青冈属; *Evergreen Quercus*: 常绿栎类; *Castanopsis/Lithocarpus*: 栲属/柯属; *Schima*: 木荷属; *Deciduous Quercus*: 落叶栎类; *Castanea*: 栗属; *Fagus*: 水青冈属; *Celtis*: 朴属; *Ulmus*: 榆属; *Pteroceltis*: 青檀属; *Alnus*: 桤木属; *Betula*: 桦属; *Juglans*: 胡桃属; *Liquidambar*: 枫香树属; *Flacourtiaceae*: 大风子科; *Morus*: 桑属; *Sapindaceae*: 无患子科; *Dalbergia*: 黄檀属; *Corylus/Carpinus*: 榛属/鹅耳枥属; *Rosaceae*: 蔷薇科; *Spiraea*: 绣线菊属; *Euphorbiaceae*: 大戟科; *Corylopsis*: 蜡瓣花属; *Ericaceae*: 杜鹃花科; *Zanthoxylum*: 花椒属; *Rhus*: 盐肤木属; *Theaceae*: 山茶科; *Eurya*: 柃属; *Caprifoliaceae*: 忍冬科; *Weigela*: 锦带花属; *Araliaceae*: 五加科; *Embelia*: 酸藤子属; *Maesa*: 杜茎山属; *Ardisia*: 紫金牛属; *Myrsinaceae*: 紫金牛科; *Poaceae*: 禾本科; *Artemisia*: 蒿属; *Aster*: 紫菀属; *Labiatae*: 唇形科; *Ranunculaceae*: 毛茛科; *Humulus*: 葎草属; *Rubiaceae*: 茜草科; *Impatiens*: 凤仙花属; *Sanguisorba*: 地榆属; *Plantago*: 车前属; *Cyperaceae*: 莎草科; AP/NAP: 木本植物花粉与非木本植物花粉比值,即 Arboreal pollen/Nonarboreal pollen 缩写

中针叶树、常绿阔叶树、落叶阔叶树、灌木花粉含量分别为 31.9%、11.0%、30.7%、14.8%，草本植物花粉含量为 11.6%。木本植物中针叶树花粉含量 (16.2%—66.0%) 最高,主要为松属 (15.8%—65.1%), 柏科/杉科 (0—8.5%) 有一定含量;落叶阔叶树花粉含量 (11.1%—56.4%) 次之,以水青冈属 (0—38.4%)、栎木属 (1.8%—10.8%) 和桦木属 (1.7%—24.9%) 为主,落叶栎类 (0—4.9%) 和榆属 (0—10.9%) 等有一定含量;灌木植物花粉含量 (4.6%—53.6%) 较低,榛属/鹅耳枥属 (0—9.5%)、蔷薇科 (0—6.1%)、花椒属 (0—29.4%)、盐肤木属 (0—35.9%) 等占优势;常绿阔叶树花粉含量 (0.7%—45.9%) 最低,以青冈属 (0—17.9%) 和常绿栎类 (0.3%—28.6%) 为主。草本植物花粉中禾本科 (5.3%)、蒿属 (2.8%) 花粉含量较高。蕨类孢子含量为 10.2%,主要见水龙骨科 (6.9%)。木本植物花粉与非木本植物花粉比值 (AP/NAP) 约为 7.6。

所有表土孢粉浓度 (30522—529648 粒/g) 很高,平均值 137122 粒/g (图 4),其中尤以松属浓度最高,达 34022 粒/g,其次常绿栎类 (11887 粒/g) 浓度超过 10000 粒/g,青冈属 (7548 粒/g)、水青冈属 (7311 粒/g)、栎木属 (7152 粒/g)、桦木属 (7866 粒/g)、禾本科和水龙骨科浓度均超过 5000 粒/g。此外,落叶栎类、榆属、榛属/鹅耳枥属、蔷薇科和蒿属等浓度也较高,均在 2000 粒/g 以上。松属和常绿栎类花粉浓度远远高于其他孢粉类型,青冈属、水青冈属、栎木属、桦木属、禾本科和水龙骨科等花粉浓度较高,这可能反映其母体植物在八大公山花粉产量较大或易散播特征;松属、青冈属、落叶栎类、榛属/鹅耳枥属、禾本科、水龙骨科等 25 个类属孢粉浓度超过 1000 粒/g,表明该区孢粉来源复杂,多样化明显,反映其母体植被群落组成复杂,较高比例物种组分分布较多。

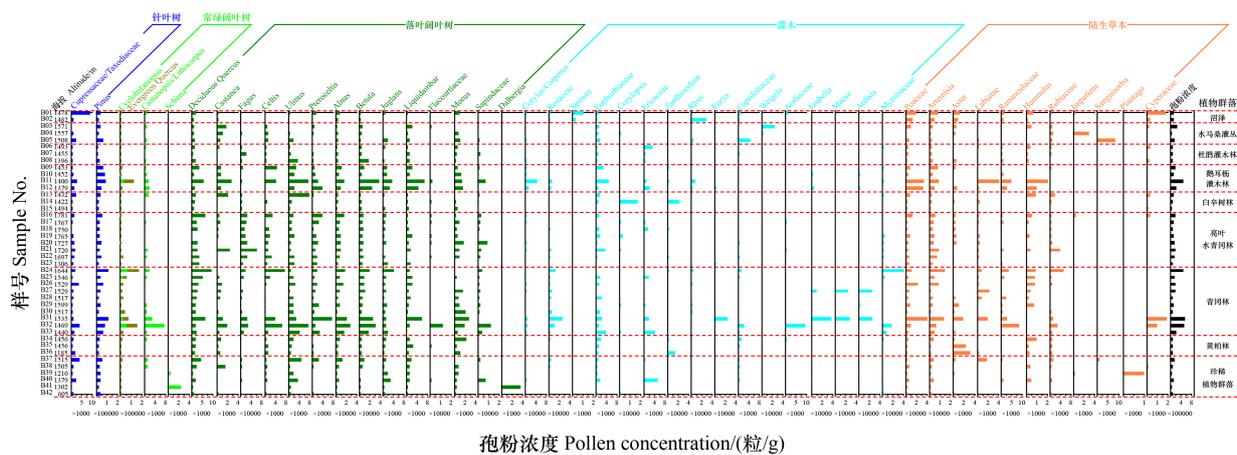


图 4 八大公山表土孢粉浓度图谱

Fig.4 Pollen concentration diagram of the surface samples from Badagong Mountains

Cupressaceae/Taxodiaceae: 柏科/杉科; *Pinus*: 松属; *Cyclobalanopsis*: 青冈属; *Evergreen Quercus*: 常绿栎类; *Castanopsis/Lithocarpus*: 栲属/柯属; *Schima*: 木荷属; *Deciduous Quercus*: 落叶栎类; *Castanea*: 栗属; *Fagus*: 水青冈属; *Celtis*: 朴属; *Ulmus*: 榆属; *Pteroceltis*: 青檀属; *Alnus*: 栎木属; *Betula*: 桦属; *Juglans*: 胡桃属; *Liquidambar*: 枫香树属; *Flacourtiaceae*: 大风子科; *Morus*: 桑属; *Sapindaceae*: 无患子科; *Dalbergia*: 黄檀属; *Corylus/Carpinus*: 榛属/鹅耳枥属; *Rosaceae*: 蔷薇科; *Spiraea*: 绣线菊属; *Euphorbiaceae*: 大戟科; *Corylopsis*: 蜡瓣花属; *Ericaceae*: 杜鹃花科; *Zanthoxylum*: 花椒属; *Rhus*: 盐肤木属; *Eurya*: 柃属; *Caprifoliaceae*: 忍冬科; *Weigela*: 锦带花属; *Araliaceae*: 五加科; *Embelia*: 酸藤子属; *Maesa*: 杜茎山属; *Ardisia*: 紫金牛属; *Myrsinaceae*: 紫金牛科; *Poaceae*: 禾本科; *Artemisia*: 蒿属; *Aster*: 紫菀属; *Labiatae*: 唇形科; *Ranunculaceae*: 毛茛科; *Humulus*: 葎草属; *Rubiaceae*: 茜草科; *Impatiens*: 凤仙花属; *Sanguisorba*: 地榆属; *Plantago*: 车前属; *Cyperaceae*: 莎草科

表土孢粉浓度在不同群落类型中差异较大。浓度最高值的乔木花粉 (164737 粒/g)、灌木花粉 (46459 粒/g)、草本植物花粉 (20890 粒/g) 均出现在青冈林,浓度最低值的乔木花粉 (23063 粒/g)、灌木花粉 (1867 粒/g)、草本花粉 (1674 粒/g) 均出现在七叶树林,蕨类孢子浓度最高值 (53641 粒/g) 出现在水马桑林,最低值出现在七叶树林 (1674 粒/g)。同一孢粉类属在不同群落类型的孢粉浓度差异较大。针叶树花粉浓度在



图 5 主要表土花粉类型

Fig.5 Main types of surface pollen

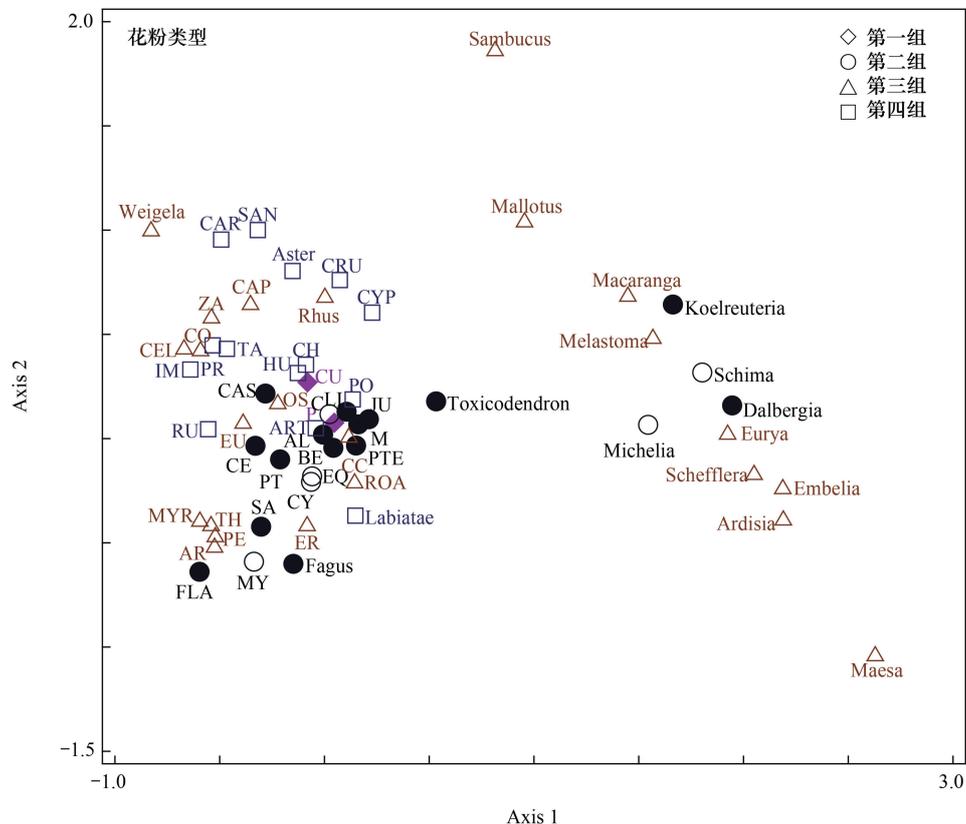
1. 血桐属 *Macaranga* (样号 B29); 2. 叶下珠属 *Phyllanthus* (样号 B23); 3. 野桐属 *Mallotus* (样号 B15); 4. 桦木属 *Betula* (样号 B19); 5. 桤木属 *Alnus* (样号 B17); 6. 鹅耳枥属 *Carpinus* (样号 B01); 7. 水青冈属 *Fagus* (样号 B21); 8. 栲属 *Castanopsis* (样号 B12); 9. 常绿栎属 *Evergreen Quercus* (样号 B11); 10. 青冈属 *Cyclobalanopsis* (样号 B07); 11. 漆树属 *Toxicodendron* (样号 B16); 12. 盐肤木属 *Rhus* (样号 B02); 13. 花椒属 *Zanthoxylum* (样号 B36); 14. 吴茱萸属 *Evodia* (样号 B29); 15. 榆属 *Ulmus* (样号 B34); 16. 青檀属 *Pteroceltis* (样号 B26); 17. 白颜树属 *Gironniera* (样号 B10); 18. 柃属 *Eurya* (样号 B12); 19. 木荷属 *Schima* (样号 B41); 20. 黄檀属 *Dalbergia* (样号 B41); 21. 蕈树属 *Altingia* (样号 B35); 22. 栎树属 *Koelreuteria* (样号 B29); 23. 紫金牛属 *Ardisia* (样号 B27); 24. 鹅掌柴属 *Schefflera* (样号 B31); 25. 胡桃属 *Juglans* (样号 B15); 26. 椴属 *Tilia* (样号 B30); 27. 禾本科 *Poaceae* (样号 B01); 28. 石竹科 *Caryophyllaceae* (样号 B35); 29. 蒿属 *Artemisia* (样号 B01); 30. 松属 *Pinus* (样号 B39); 31. 里白属 *Hicriopteris* (样号 B42); 32. 水龙骨科 *Polypodiaceae* (样号 B42). 图示标本保存于吉首大学生态旅游湖南省重点实验室

鹅耳枥灌木林中均值最高 (62678 粒/g), 在杜鹃灌木林中均值最低 (12323 粒/g); 常绿树和落叶树花粉浓度在青冈林中均值最高 (56419 粒/g 和 56468 粒/g), 而前者在湖北枫杨林中仅 874 粒/g, 后者在小花木荷林中仅 7271 粒/g; 灌木花粉浓度也在青冈林中达均值最高 (46459 粒/g), 在七叶树林中仅 1867 粒/g; 草本植物花粉浓度在鹅耳枥灌木林中均值最高 (30835 粒/g), 在七叶树林中均值最低 (1674 粒/g)。在不同群落类型中对所有表土孢粉含量与浓度变化作比较, 沼泽、水马桑灌丛、鹅耳枥灌木林的二者变化趋势基本一致 (图 3)。

3.2 DCA

利用 Canoco 5.0 软件对所有样品表土孢粉百分含量进行降趋势对应分析 (Detrended correspondence analysis, DCA), 从分析的 127 科 (属) 中除去含量小于 1% 和只在个别样品中出现的科 (属), 对剩余的 61 科 (属) 中含量较小的科 (属) 降低权重, 将孢粉类型按针叶树、阔叶树 (包括常绿阔叶树和落叶阔叶树)、灌木、草本植物孢粉分为四组, 在此基础上排序分析 (图 6)。

结果显示, 前两轴累积方差贡献率为 25.9% (Axis 1=16.8%, Axis 2=9.1%)。第一轴正方向分布样品的花粉类型主要为常绿阔叶树+落叶阔叶树+灌木+草本花粉; 负方向分布样品的花粉类型主要为落叶阔叶树+常绿阔叶树+灌木花粉, 这可能反映湿度梯度的变化, 正方向湿度稍低, 更适应草本植物生长, 负方向湿度较高, 主要分布乔木。第二轴正方向分布的样品主要来自灌丛/灌木林+黄柏林+白辛树林+沼泽, 花粉类型主要为常绿阔叶树+灌木+草本; 负方向分布的样品主要来自青冈林+亮叶水青冈林, 花粉类型主要为落叶阔叶树+灌木。综合样点高程分析, 亮叶水青冈、青冈林海拔分布普遍高于其正方向上的样品所在群落, 推测第二轴和温度条件变化有关, 正方向气温较高, 负方向气温较低。通过花粉相对百分含量聚类分析和 DCA, 能较好地地区分沼泽、水马桑灌丛、鹅耳枥灌木林和阔叶林, 水马桑灌丛、鹅耳枥灌木林和杜鹃灌木林可以区分, 但杜鹃灌木林、亮叶水青冈林和青冈林的分布较集中, 较难区分。这主要源于亚热带山地植被组成成分十分复杂, 建群种优势度不高, 混杂现象十分显著。杜鹃灌木林中常常大量混生亮叶水青冈、多脉青冈、曼青冈, 以及杜鹃花科花粉代表性较低, 导致其与亮叶水青冈林和青冈林孢粉组合相似度较高。各珍稀植物群落涵盖落叶阔叶林、常绿阔叶林以及常绿落叶阔叶混交林, 样品分布分散。这可能主要由于珍稀植物花粉产量较低, 使得优势



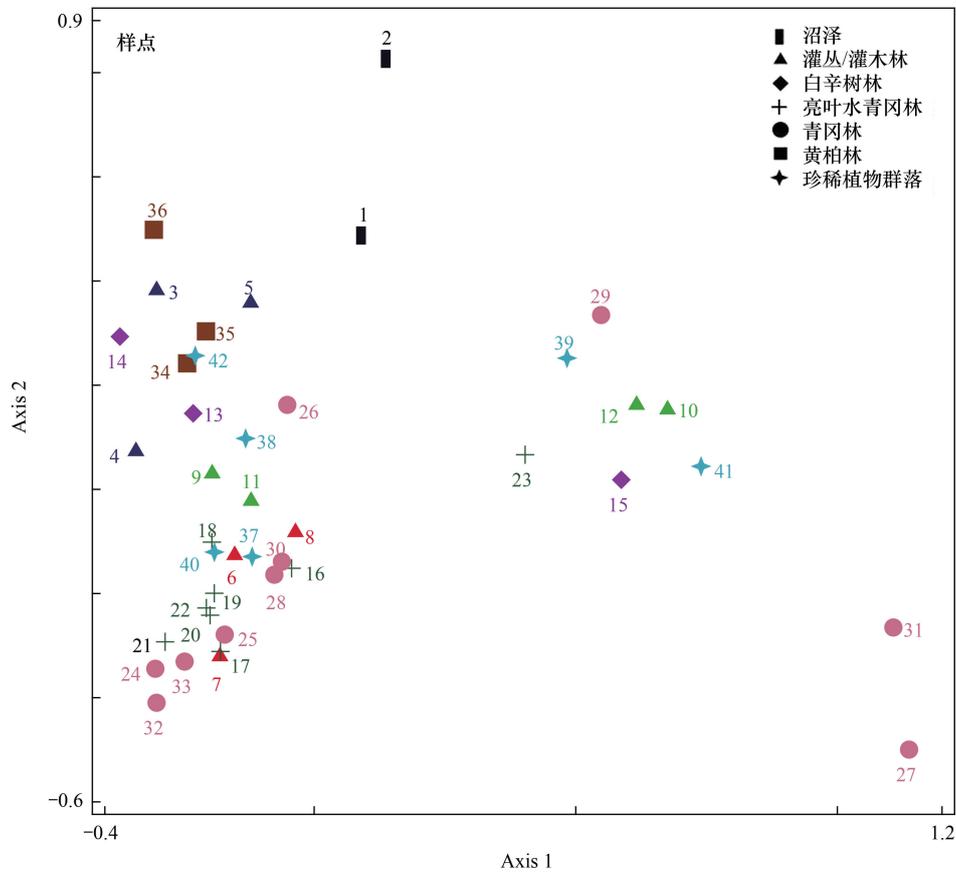


图 6 花粉类型与样点的降趋势对应分析排序图

Fig.6 Detrended correspondence analysis results of surface pollen taxa and pollen sampling sites

CU: 柏科 Cupressaceae; P: 松属 *Pinus*; CY: 青冈属 *Cyclobalanopsis*; C: 栲属 *Castanopsis*; ER: 常绿栎类 *Evergreen Quercus*; MY: 桃金娘科 Myrtaceae; *Michelia*: 含笑属; *Schima*: 木荷属; CAS: 栗属 *Castanea*; *Fagus*: 水青冈属; CE: 朴属 *Celtis*; PTE: 青檀属 *Pteroceltis*; AL: 桤木属 *Alnus*; BE: 桦属 *Betula*; PT: 枫杨属 *Pterocarya*; JU: 胡桃属 *Juglans*; LI: 枫香树属 *Liquidambar*; FLA: 大风子科 Flacourtiaceae; M: 桑属 *Morus*; *Toxicodendron*: 漆属; *Koelreuteria*: 栾树属; SA: 无患子科 Sapindaceae; *Dalbergia*: 黄檀属; CC: 榛/鹅耳枥属 *Corylus/Carpinus*; ROA: 蔷薇科 Rosaceae; EU: 大戟科 Euphorbiaceae; *Mallotus*: 野桐属; *Macaranga*: 血桐属; CO: 蜡瓣花属 *Corylopsis*; ER: 杜鹃花科 *Ericaceae*; ZA: 花椒属 *Zanthoxylum*; PE: 胡椒属 *Peperonia*; Rhus: 盐肤木属; TH: 山茶科 *Theaceae*; Eurya: 柃属; CAP: 忍冬科 *Caprifoliaceae*; Weigela: 锦带花属; *Sambucus*: 接骨木属; CEL: 南蛇藤属 *Celastrus*; AR: 五加科 *Araliaceae*; Schefflera: 鹅掌柴属; OS: 木樨属 *Osmanthus*; Embelia: 酸藤子属; Maesa: 杜茎山属; Ardisia: 紫金牛属; MYR: 紫金牛科 *Myrsinaceae*; Melastoma: 野牡丹属; PO: 禾本科 *Poaceae*; CH: 藜科 *Chenopodiaceae*; ART: 蒿属 *Artemisia*; Aster: 紫菀属; TA: 蒲公英属 *Taraxacum*; CRU: 十字花科 *Cruciferae*; Labiatae: 唇形科; HU: 葎草属 *Humulus*; RU: 茜草科 *Rubiaceae*; PR: 报春花科 *Primulaceae*; IM: 凤仙花属 *Impatiens*; SAN: 地榆属 *Sanguisorba*; CAR: 竹科 *Caryophyllaceae*; CYP: 莎草科 *Cyperaceae*; 花粉类型 *Pollen taxa*: 第一组 *Group 1*: 针叶树 *Conifers*; 第二组 *Group 2*: 阔叶树 *Broad-leaved trees*; 第三组 *Group 3*: 灌木 *Shrubs*; 第四组 *Group 4*: 草本植物 *Terrestrial herbs*; 样点 *Sampling sites*: 1—2: 沼泽; 3—5: 水马桑灌丛; 6—8: 杜鹃灌木林; 9—12: 鹅耳枥灌木林; 13—15: 白辛树林; 16—23: 亮叶水青冈林; 24—33: 青冈林; 34—36: 黄柏林; 37—42: 珍稀植物群落

种花粉含量不明显,且其常被周边其他阔叶林包围,外源花粉种类组成复杂,以及受松属、桦木属和桤木属等超代表性花粉干扰,大大稀释了其优势种花粉含量的缘故。黄柏林与灌丛/灌木林较难区分,黄柏林虽为人工栽培纯林,但其属于人类活动频繁区,附近往往为森林破坏后次生灌丛/灌木林,外源花粉干扰严重,导致其花粉含量较低。

4 讨论

4.1 孢粉组合与植物群落的关系

研究区植物群落主要有沼泽、水马桑灌丛、杜鹃灌木林、鹅耳枥灌木林、白辛树林、亮叶水青冈林、青冈林、黄柏林以及 6 种珍稀植物群落,各植物群落的孢粉组合特征见图 3。

1) 沼泽 孢粉组合中灌木花粉 (11.0%—43.6%) 和草本花粉含量 (23.3%—30.8%) 较高,以榛属/鹅耳枥属 (1.8%—3.1%)、盐肤木属 (0.1%—35.9%)、禾本科 (14.6%—17.1%) 和蒿属 (4.8%—6.8%) 为主。落叶阔叶树花粉含量 (11.1%—15.7%) 次之,主要见栾木属 (6.8%—5.3%)、桦木属 (2.3%—2.5%)、落叶栎类 (1.2%—1.7%)。针叶树花粉含量最高 (21.2%—36.0%),以松属 (20.4%—27.5%) 为主。常绿阔叶树花粉含量 (0.7%—6.5%) 最低,常绿栎类 (0.3%—3.7%)、青冈属 (0.1%—2%) 等有一定含量。水生草本花粉见香蒲属 (0.1%);蕨类孢子占比 (4.2%) 较低,主要见紫萁属 (3.1%)。AP/NAP 比值约为 2.8,孢粉浓度 94034 粒/g。主要孢粉类型盐肤木属、禾本科、蒿属、紫萁属、蔷薇科花粉,与沼泽中优势种盐肤木、拂子茅、荇草、紫萁和狭叶绣线菊等对应较好,表明孢粉组合可以指示母体植物群落的部分组成特征。

2) 水马桑灌丛 孢粉组合中落叶阔叶树花粉含量 (13.9%—32.4%) 较高,以桦木属 (1.7%—24.9%)、栎木属 (0.4%—7.7%) 为主。灌木花粉含量 (10.5%—32.6%) 次之,以锦带花属 (0—23.8%) 为主。草本花粉含量 (14.5%—14.9%) 较低,主要见禾本科 (0.3%—8.6%)。针叶树花粉含量 (35.8%—52.4%) 最高,以松属 (33.4%—50.7%) 为主。常绿阔叶树花粉含量 (2.2%—7.8%) 最低,主要见常绿栎类 (0.4%—4.6%) 和青冈属 (0.9%—2.4%)。蕨类孢子占比 (58.2%) 较高,以水龙骨科 (54.2%) 为主。AP/NAP 比值约为 5.8,孢粉浓度 133864 粒/g。灌木和草本花粉含量为 33.3%,主要孢粉类型锦带花属、禾本科、常绿栎类、青冈属花粉,与水马桑灌丛中主要分布的水马桑、大叶知风草、芭茅、多脉青冈等形成较好对应。未见樟科花粉,与群落中宜昌木姜子难对应,且松属、栎木属、桦木属花粉含量较高,也未见其母体植物分布,这可能源于樟科花粉壁薄较难保存,以及松属、栎木属和桦木属花粉具有超代表性与易传播所致^[35—36]。故花粉组合能指示群落中主要植物种类,较难反映母体植物群落特征。

3) 杜鹃灌木林 孢粉组合中落叶阔叶树花粉含量 (29.2%—56.4%) 最高,以水青冈属 (2.5%—32.5%)、桦木属 (7.1%—24.9%) 和栎木属 (6.4%—6.6%) 为主。针叶树花粉含量 (16.4%—28.5%) 次之,以松属 (15.8%—27.9%) 为主。灌木花粉含量 (8.7%—19.0%) 再次,以杜鹃花科 (0.8%—8.9%) 为主。草本花粉含量 (8.3%—14.0%) 较低,主要见禾本科 (2.3%—6.1%)、蒿属 (2.6%—3.4%)。常绿阔叶树花粉含量 (5.6%—12.3%) 最低,主要见常绿栎类 (3.1%—8.5%) 和青冈属 (1.9%—3.1%)。水生草本花粉见香蒲属 (0.1%);蕨类孢子占比 14.2%,主要见水龙骨科 (7.4%) 和金星蕨科 (3.5%)。AP/NAP 比值约为 8.9,孢粉浓度 57833 粒/g。灌木和草本花粉含量为 22.8%,主要孢粉类型杜鹃花科、水青冈属、青冈属、禾本科,与杜鹃灌木林中主要分布的四川杜鹃、长蕊杜鹃、小果南烛、亮叶水青冈、多脉青冈、阔叶箬竹等对应较好。黄丹木姜子、红果钓樟和檫木、四照花等有较多植株分布,但未见樟科和山茱萸属花粉。杜鹃花科花粉虽含量不高,但与非杜鹃群落对比明显较高,这可能与杜鹃花科是虫媒植物,传播性较差,呈低代表性有关^[37]。故花粉组合能指示建群种和主要优势种类型,较难反映母体植物群落的整体组成特征。

4) 鹅耳枥灌木林 孢粉组合中落叶阔叶树花粉含量 (18.0%—29.3%) 较高,以桦木属 (3.0%—12.6%)、栎木属 (3.5%—7.7%) 为主。灌木花粉含量 (8.3%—20.0%) 次之,以榛属/鹅耳枥属 (2.7%—9.5%) 为主。草本花粉含量 (5.9%—23.5%) 再次,主要见禾本科 (2.7%—17.7%) 和蒿属 (1.8%—5.2%)。针叶树含量 (19.2%—66%) 最高,以松属 (18.5%—65.1%) 为主。常绿阔叶树花粉含量 (1.8%—27.5%) 较低,主要见常绿栎类 (0.9%—18.0%) 和青冈属 (0—9.2%)。水生草本花粉见香蒲属 (0.1%);蕨类孢子占比 (5.0%) 最低,主要见水龙骨科 (3.4%) 和里白属 (1.2%)。AP/NAP 比值约为 8.4,孢粉浓度 227321 粒/g。灌木和草本花粉含量为 27.2%,主要孢粉类型榛属/鹅耳枥属、常绿栎类、青冈属、桦木属,与鹅耳枥灌木林中主要分布的鹅耳枥、多脉青冈、细叶青冈、香桦等能较好对应。山柳、檀梨、宜昌润楠、红果钓樟、木荷、灯台树、四照花、冬青等有较多分布,但花粉含量很低,这可能与柳属花粉代表性低,山茶科为虫媒植物其花粉易被啃食,以及冬青科花粉不易保存等原因有关^[38—39]。故花粉组合仅指示优势种和部分共建种,较难反映母体群落中植物组成规律。

5) 白辛树林 孢粉组合中落叶阔叶树花粉含量 (17.6%—32.4%) 较高,以落叶栎类 (1.7%—3.7%)、榆

属(1.5%—10.9%)、桤木属(3.7%—5.3%)和桦木属(3.4%—11.8%)为主。灌木花粉含量(6.7%—53.6%)次之,见榛属/鹅耳枥属(0—1.6%)和紫金牛属(0—2.4%)。针叶树花粉含量(20.6%—41.6%)最高,以松属(19.9%—39.6%)为主。草本花粉含量(3.8%—16.5%)较低,主要见禾本科(1.1%—7.9%)和蒿属(1.5%—2.2%)。常绿阔叶树花粉含量(4.4%—8.3%)最低,见常绿栎类(3.2%—4.5%)、青冈属(1.1%—2.7%)等。水生草本花粉见香蒲属(0.4%);蕨类孢子占比8.4%,主要见水龙骨科(4.2%)。AP/NAP比值约为13.8,孢粉浓度63667粒/g。落叶阔叶树花粉含量约为30.0%,未见白辛树属、连香树属和山茱萸属花粉,但群落中有其较多母体植株分布,这可能与水青树、多脉青冈等乔木盖度较大,当地气温和降水等气候条件、自身天然更新能力较低等影响白辛树、连香树花粉产量^[40-41],以及外来松属、桦木属等花粉含量较高(40%)等原因有关。故花粉组合未能反映母体植物群落的组成特征。

6) 亮叶水青冈林 孢粉组合中落叶阔叶树花粉含量占绝对优势(37.7%—56.2%),以水青冈属(8.5%—38.4%)、桤木属(5.2%—9.9%)和桦木属(3.3%—10.0%)为主。针叶树花粉含量(17.7%—33.7%)次之,主要见松属(16.7%—32.7%)。草本花粉含量(7.1%—15.1%)再次,以禾本科(1.9%—7.7%)和蒿属(2.5%—5.0%)为主。灌木花粉(4.6%—11.5%)较低,主要见榛属/鹅耳枥属(0.2%—2.9%)、蔷薇科(0—1.9%)、花椒属(0—3.7%)、山茶科(0—1.9%)等。常绿阔叶树花粉含量(2.3%—15.2%)较低,主要见常绿栎类(1.3%—5.4%)和青冈属(0—7.9%)。蕨类孢子占比(4.2%)最低,主要见水龙骨科(1.8%)和里白属(1.5%)。AP/NAP比值约为9,孢粉浓度111942粒/g。阔叶树花粉含量超过一半(50.3%),主要花粉类型水青冈属、常绿栎类、青冈属、漆树属、杜鹃花科、山矾属、蔷薇科,与亮叶水青冈林中主要分布的亮叶水青冈、多脉青冈、五裂槭、金山杜鹃、四川杜鹃、灯笼花、茶条果、水榆花楸、中华石楠等对应较好。水青冈属花粉含量可达20%,与优势种亮叶水青冈对应较好,表明花粉组合能较好反映母体植物群落的组成特征。

7) 青冈林 孢粉组合中落叶阔叶树、针叶树、灌木和常绿阔叶树四者花粉含量相当。落叶阔叶树花粉含量占相对优势(17.2%—34.5%),主要见桤木属(1.8%—8.7%)、桦木属(4.0%—9.3%)、水青冈属(0—6.4%)和落叶栎类(0.4%—3.7%)。针叶树花粉含量(16.2%—36.6%)稍次之,以松属(15.8%—35.8%)为主;灌木花粉含量(6.3%—44.2%)再次,主要见紫金牛属(0—16.2%)、蔷薇科(0.4%—6.1%)、酸藤子属(0—7.2%)、杜茎山属(0—16.0%)、紫金牛科(0—8.4%)、榛属/鹅耳枥属(0.2%—2.3%)和山茶科(0—4.0%);常绿阔叶树花粉含量为3.6%—45.9%,以常绿栎类(1.5%—28.6%)和青冈属(0.9%—17.9%)为主。草本花粉含量(4.7%—21.3%)较低,见禾本科(1.6%—14.2%)和蒿属(0.6%—5.1%)。蕨类孢子占比(3.0%)最低,见水龙骨科(1.5%)。AP/NAP比值约为12.1,孢粉浓度285717粒/g。阔叶树花粉含量占优势(44.82%),主要花粉类型常绿栎类、青冈属、水青冈属、蔷薇科、柃属、榛属/鹅耳枥属、栗属、漆树属、杜鹃花科、禾本科花粉等,与青冈林中主要分布的细叶青冈、多脉青冈、亮叶水青冈、小叶青冈、杜鹃、柃木、石灰花楸、灰叶稠李、板栗、巴东栎、茶条果、野漆树、鹅耳枥、箭竹对应较好。青冈—常绿栎类花粉较高的花粉含量与群落优势属种青冈对应较好。黄丹木姜子、中华五加、木荷和白辛树等分布较多,未见其花粉。故孢粉组合能较好反映植物群落的主要组成特征,但仅指示优势种和部分共建种。

8) 黄柏林 孢粉组合中落叶阔叶树花粉含量(24.8%—34.3%)最高,以桤木属(6.1%—10.8%)和桦木属(5.5%—5.8%)为主。针叶树花粉含量(26.6%—32.1%)与落叶阔叶树花粉含量相当,以松属(23.2%—30.4%)为主。灌木花粉含量(9.7%—30.0%)次之,以花椒属(3.1%—26.3%)为主。草本花粉含量(11.9%—14.3%)再次,主要见禾本科(3.2%—4.0%)、紫菀属(0.2%—5.9%)和蒿属(1.0%—4.1%)。常绿阔叶树花粉含量(5.5%—13.9%)较低,主要见常绿栎类(3.0%—8.3%)和青冈属。水生草本花粉见香蒲属(0.1%);蕨类孢子占比(8.7%)最低,见水龙骨科(3.6%)和金星蕨科(3.0%)。AP/NAP比值约为6.7,孢粉浓度59818粒/g。黄柏林为人工栽培药材林,花粉鉴定中未见黄槿属花粉,这可能源于采伐时树龄未到,黄柏还未开花或被间伐,导致其花粉含量低。黄槿属花粉对母体群落指示性差,故孢粉组合未能反映母体植物群落的组成特征。

9) 珍稀植物群落 本研究在八大公山目前主要发现珍稀植物群落珙桐林、野生板栗林、湖北枫杨林、蓝果树林、七叶树林、小花木荷林。其中,珙桐林孢粉组合中针叶树花粉含量(39.6%)占明显优势,主要见松属(36.5%)。落叶阔叶树花粉含量(32.8%)次之,主要见桤木属(8.6%)和桦木属(6.8%)。其余类型孢粉含量较低。AP/NAP 比值约为 13,孢粉浓度 143985 粒/g。孢粉组合中未见珙桐属花粉,其呈很低代表性,这与前人研究结果相似^[42]。

野生板栗林孢粉组合中针叶树花粉含量(35.3%)与落叶阔叶树花粉含量(34.4%)相当,前者以松属(33.9%)为主,后者以桤木属(9.0%)和桦木属(9.5%)为主,见落叶栎类(3.9%)、栗属(2.9%)等。其余类型孢粉含量较低。AP/NAP 比值约为 7,孢粉浓度 69970 粒/g。孢粉组合中栗属花粉含量(2.4%)高于其他非板栗群落,但远低于母体植株在群落中覆盖度,栗属花粉在亚热带森林中呈低代表性^[43],孢粉组合能指示母体植物群落的主要植物种类。

湖北枫杨林孢粉组合中针叶树花粉含量(62.5%)占明显优势,以松属(61.5%)为主。落叶阔叶树花粉含量(20.6%)次之,以桤木属(3.6%)、榆属(4.0%)和胡桃属(4.0%)为主。其余类型孢粉含量较低。AP/NAP 比值约为 10,孢粉浓度 45281 粒/g。孢粉组合中枫杨属花粉含量很低(0.2%),其对母体植物群落的指示性较差,这与神农架地区枫杨属花粉呈低代表性的研究结果相似^[44]。

蓝果树林孢粉组合中针叶树花粉(37.4%)与落叶阔叶树花粉(33.5%)含量相当,前者以松属(35.1%)为主,后者主要见无患子科(7.9%)、桤木属(5.2%)和榆属(4.2%)。其余类型孢粉含量较低。水生草本花粉见香蒲属(0.3%)。AP/NAP 比值约为 7,孢粉浓度 90889 粒/g。七叶树林孢粉组合中针叶树花粉含量(47.1%)占明显优势,以松属(46.7%)为主。落叶阔叶树花粉含量(29.2%)次之,以黄檀属(12.1%)为主。其余类型孢粉含量较低。AP/NAP 比值约为 16,孢粉浓度 30522 粒/g。蓝果树林和七叶树林孢粉组合中均未见其优势种花粉,这可能源于其分布面积狭小,更新能力弱,花粉产量低,导致其指示性差。

小花木荷林孢粉组合中针叶树花粉含量(59.7%)占明显优势,以松属(57.7%)为主。其余类型孢粉含量较低。AP/NAP 比值约为 9,孢粉浓度 59013 粒/g。孢粉组合中未见木荷属花粉,前人研究发现其花粉在常绿阔叶林植被中呈低代表性^[45]。因此,珍稀植物群落中除野生板栗林,其余 5 种群落孢粉组合均不能反映母体群落组成特征。

4.2 主要孢粉类型的代表性特征

松属花粉出现在所有样品中,平均含量为(30.6%),区域内仅样点 B12 鹅耳枥灌木林和 B42 小花木荷林见马尾松,花粉含量分别为 19.8%和 57.7%,其他样点未见松树分布,花粉平均百分含量 30.14%,说明其花粉产量大,扩散能力强,由于其有两个发达的气囊,可以在空中进行长距离搬运,具有超代表性,松属花粉含量 30%以下,不能确定松树的分布^[46]。

栎属花粉可分为落叶栎类和常绿栎类。所有样品中均发现落叶栎类花粉,平均含量为 2.2%,样点样方中未见栎属落叶类型分布,落叶栎类花粉具有超代表性,这与前人在浙江金华北山研究结果相一致^[45],落叶栎类花粉 3%以下的含量不能指示样点周围母体植物的生长。

所有样品中常绿栎类花粉平均含量为 6.4%,青冈属花粉平均含量为 3.7%。多脉青冈、细叶青冈、小叶青冈和曼青冈出现在除沼泽外所有植物群落类型中,共发现青冈约 304 株,胸径主要为 20—30 cm;常绿栎类乔木样方中呈仅见巴东栎,零星分布有 8 株,胸径为 22—30 cm。样点附近分布青冈或巴东栎,常绿栎类花粉含量为 7.3%,青冈属花粉含量为 4.3%;样点附近未见青冈与巴东栎分布,常绿栎类花粉含量为 2.9%,青冈属花粉含量为 1.4%;青冈林 B24—B33 中青冈属花粉含量达 8.7%,常绿栎类花粉含量达 13.5%。青冈林中样点 B24、B27、B29 中均发现青冈和巴东栎,其中前者约为 37 株/样,后者分别为 2 株/样;这 3 个样点孢粉组合中青冈属花粉含量为 6.3%,常绿栎类花粉含量为 9.3%。青冈林中样点 B25、B26、B28、B30—B33 未见巴东栎,只分布青冈,约 14 株/样,青冈属花粉含量为 9.7%,常绿栎类为 15.2%。

由于青冈属与常绿栎类花粉形态结构非常相似,*Cyclobalanopsis* 属三拟孔沟,孔不明显,表面细颗粒或尖

小刺矮柱状, *Evergreen Quercus* 属三拟孔沟(个别三沟), 沟较长, 表面细颗粒或尖小刺矮柱状, 两者直径大小均常在 30 μm 以下, 差别微小, 鉴定区分很困难, 故部分学者支持将青冈属归为栎属, 作为栎属下的青冈亚属级别^[47-48]。大老岭孢粉研究认为青冈属花粉代表性适中^[39]; 有关常绿栎类花粉代表性特征众说纷纭, 常绿栎类花粉为近源沉积^[49], 浙江嵊州西白山研究发现其代表性适中^[16], 也有研究认为其具低代表性^[45], 还有学者认为常绿栎类花粉呈超代表性^[50-52]。常绿栎类花粉代表性研究结果差异较大, 这可能与各研究区不同常绿栎类植物自身花粉产量, 散播特征差异有关, 也可能受群落中其他植物孢粉学特性以及自然环境影响。本研究认为青冈属花粉代表性适中, 常绿栎类花粉代表性较高。样方中高含量常绿栎类花粉与巴东栎零星分布不能对应; 较低含量的青冈属花粉与群落中较高比例的多脉青冈、细叶青冈难以对应。这主要缘由可能是孢粉鉴定时误将部分青冈属花粉统计为常绿栎类花粉, 导致常绿栎类花粉明显高于其实际含量。因此, 本研究认为在我国南方亚热带地区进行孢粉学研究时将青冈属与常绿栎类花粉归并为青冈-常绿栎类花粉比较适宜。所有样品孢粉组合中青冈-常绿栎类花粉平均含量为 10.1%, 青冈林中其含量较高 (22.2%), 青冈-常绿栎类花粉较高的花粉含量与群落中青冈的优势占比对应较好, 因此其花粉代表性适中, 对植被有较好地指示作用。

所有样品中水青冈属花粉平均含量为 5.9%, B16—B23 样点为亮叶水青冈林, 其花粉平均含量较高 (18.8%); 当样点附近未见亮叶水青冈分布, 其花粉含量约为 0.8%。根据植物物种组成及其优势度差异, 亮叶水青冈群落可分为亮叶水青冈纯林、亮叶水青冈+杜鹃群落、亮叶水青冈+多脉青冈群落。其纯林样点 B19—B21 中水青冈属花粉含量达 25%; 与杜鹃共优势群落样点 B16—B18 中其花粉含量为 17.2%, 杜鹃花科花粉含量约 1%; 与多脉青冈共优势群落样点 B22、B23 中其花粉含量为 12.1%, 青冈-常绿栎类花粉含量约 8%。当亮叶水青冈和其他树种组成共优势群落, 其花粉含量比纯林约低 10%。植物物种多样性指数反映群落物种数量多寡及个体数量均匀度等变化, 常以 Shannon-Wiener 指数表示, 八大公山亮叶水青冈群落中的单优纯林多样性指数较低, 亮叶水青冈与其他阔叶树共优势种群落的多样性指数更高^[27]。纯林水青冈属花粉含量更高, 共优群落的花粉含量相对更低; 若共优势种花粉呈低代表性, 则水青冈属花粉含量略高于 15%; 若共优势种花粉代表性适中, 则其花粉含量稍低于 15%。因此推断, 群落物种多样性是影响孢粉组合特征的重要因素, 水青冈属花粉含量与植物多样性指数呈负相关。

水青冈属花粉含量差异还可能与外来花粉抑制作用有关。样点 B21 为亮叶水青冈纯林, 松属花粉百分含量为 16.7%, 水青冈属花粉含量最高 38.4%; 样点 B19、B20 也是纯林, 松属花粉含量为 28.5%, 水青冈属花粉相对较低, 为 18.2%。由于样点 B19、B20 和 21 相距较近, 林分特征相同, 即树种组成、森林起源、林层或林相、林型、林龄非常相似, 其花粉组合特征应该相差甚微。B21 的松属花粉含量与 B19 和 B20 相差 11.8%, 这可能是局地环流形势引起外来花粉沉积差异; 但水青冈属花粉含量相差 20%, 可以认为是外来超代表性松属花粉的百分比递减补偿率影响所致。水青冈属花粉呈低代表性, 水青冈群落中其花粉含量往往低于 5%—10%^[53], 中国南方内陆山地水青冈属花粉在孢粉组合中含量大于 6.0% 时才可能存在水青冈林^[54]。日本本州白神山地水青冈林表土花粉研究发现其花粉含量在 35%—40% 以上, 特殊生境中非地带性被影响下的花粉含量约为 15%, 林外或无林地 5% 以下^[55]。若是剔除松属等超代表性花粉的百分比递减补偿率影响, 八大公山亮叶水青冈纯林的其花粉含量可达 40% 左右, 这和日本本州白神山地圆齿水青冈林的研究结果相一致。本研究认为水青冈属花粉对植被有较好的指示作用, 样品中其花粉含量超过 25% 可以反映样点取自亮叶水青冈纯林, 15% 左右含量花粉则表明可能受到其他共优种花粉影响, 花粉含量低于 1% 则表明样点附近不确定亮叶水青冈的生长。

所有样品中都有桦木属花粉出现, 平均含量为 6.4%, 样点 B08、B11、B23、B26、B32、B33、B37 附近有香桦分布, 其花粉含量约 10%; 样点周围没有桦树生长, 其花粉含量为 5.6%。桦木属花粉呈超代表性, 其花粉含量 5% 左右不能确定样点附近母体植物的分布^[56]。

桤木属花粉在所有样品中均能见到, 平均含量约 6.0%, 样点中并未见桤木生长。桤木属花粉呈超代表

性,云南松林和草丛中几乎没有桤木分布,其花粉含量达 9.0%^[57],这可能表明桤木花粉产量大,传播能力强,10%左右的桤木属花粉含量不能指示其附近桤木的生长。

所有样品中都有禾本科花粉出现,平均含量为 5.3%,沼泽样点 B01 和 B02 其花粉含量分别为 17.1% 和 14.6%,明显高于其他植物群落中禾本科花粉含量(4.8%)。植被样方调查发现,沼泽中佛子茅和荩草生长较为繁盛,盖度达 0.55。禾本科花粉传播能力较弱,样点中其花粉主要为沼泽中原地沉积。禾本科花粉呈低代表性,这与重庆中梁山岩溶槽谷区和华南武夷山表土孢粉研究结果相一致^[58]。

4.3 孢粉组合的群落生态及植被指示意义

八大公山表土孢粉与母体植物群落对比研究发现,白辛树林、黄柏林以及 5 种珍稀植物群落的孢粉组合未能反映母体植物群落的组成特征,部分优势种花粉的植被指示性较差;沼泽、水马桑灌丛、杜鹃灌木林、鹅耳枥灌木林和板栗林的孢粉组合能部分反映母体群落的组成特征,但指示性不强;亮叶水青冈林和青冈林孢粉组合能较好反映母体植物群落的主要组成特征,优势种与其较高花粉含量对应较好。导致上述结果,除植物花粉产量、散播与保存能力的影响外,气候与环境也是重要原因。(1)八大公山保护区植物物种多样性十分丰富,现有高等植物 177 科 852 属 2160 种^[24-25],孢粉统计虽然平均每样 574 粒,最高可达 1186 粒,但仍然难以囊括所有植物组成成分,部分孢粉壁比较薄,实验前处理时容易发生损坏或腐蚀,给鉴定分析带来困难,这也是孢粉组合与群落植物物种对应关系复杂原因之一。(2)八大公山马尾松源自 20 世纪 70 年代飞机播种,现零星分布在个别地段,本研究只在样点 B12 和 B42 各发现 1 株马尾松,松属花粉可能主要来自山麓地带松树林,受上升气流影响,松花粉随风沿坡向上被携带至山顶逐步沉降,导致孢粉组合中松属花粉含量达 30%。(3)该区地势地貌复杂,岭高谷深、坡陡顶窄^[59],部分地段通行比较困难,样方只能依据地形设置 5 m×15 m 或 10 m×15 m 等,难以采用标准样方,导致样方面积大小波动较大,以及部分植物群落属于小群落,样品孢粉组合受外来植物花粉百分比递减补偿作用干扰较大,这也是群落植物优势种花粉指示性弱的原因。(4)DCA 结果显示青冈林样品和亮叶水青冈林样品区分不明显,存在部分交叉,前者分布较为离散,后者则更为集中。多脉青冈常为天然次生林中喜阳先锋种,随着群落演替的不断推进,先锋树种竞争力降低并逐渐被资源保守型策略物种替代,这类物种面对外界不利因素具有较强抵抗能力,生长较缓慢^[60]。与其他先锋树种不同,多脉青冈具有性和无性两种繁殖方式以及很强的更新能力,兼具顶级种特征^[61];亮叶水青冈是亚热带山地常绿阔叶林中顶级群落中主要优势种^[62]。亮叶水青冈和多脉青冈共优势林是八大公山主要林型,亮叶水青冈林中亮叶水青冈占主要优势,多脉青冈占次要优势,多脉青冈林中多脉青冈占主要优势,亮叶水青冈占次要优势,二者处于群落演替的前后两个阶段。演替过程中两者生态位可能存在部分重叠,多脉青冈的生态幅比亮叶水青冈更宽。尽管亮叶水青冈和多脉青冈在其主要优势群落中花粉含量各自占比突出,但由于物种多样性和各植物种类占比等差异较小,以及不同花粉类型代表性干扰,导致花粉组合相似度较高,故在 DCA 中较难区别。

亮叶水青冈系中国特有种及第三纪残留种,常在冷湿风大的山顶或中山山坡形成单优群落,林中混生着珙桐、连香树、水青树、杜仲等珍稀孑遗树种,在森林生态系统物种组成、物质循环以及古生态研究中具有重要价值^[63]。亮叶水青冈花粉对母体群落的指示性较好,但受植物物种组成和外来花粉影响,其花粉含量波动变化较大。未来有关亮叶水青冈花粉指示特征的分析,可以选择人工林和天然林不同林型,对不同演替阶段群落设置样方,结合野外空气花粉监测数据,探讨多重影响因素下的亮叶水青冈林孢粉组合特征,为亚热带山地古气候反演和古环境重建,以及群落演替研究和森林保育提供理论支撑和基础数据。

5 结论

通过八大公山 42 个样点表土孢粉组合及其与植物群落之间关系分析,得出以下结论:1) 孢粉组合中松属、青冈属、常绿栎类、落叶栎类、水青冈属、桤木属、桦木属、禾本科、蒿属和水龙骨科为主要孢粉类型;木本植物花粉百分含量占绝对优势,沼泽、水马桑灌丛、鹅耳枥灌木林的孢粉百分含量与浓度变化趋向一致。2) 研

究区表土孢粉组合与群落类型并不完全对应。白辛树林、黄柏林及 5 种珍稀植物群落的花粉组合未能反映母体植物群落组成特征,沼泽、水马桑灌丛、杜鹃灌木林、鹅耳枥灌木林和野生板栗林花粉组合能部分反映母体植物群落组成特征,亮叶水青冈林和青冈林花粉组合能较好反映母体植物群落主要组成特征,且优势种与其较高花粉含量相对应。3) 主要花粉类型中松属、桉木属、桦木属、落叶栎类具有超代表性,青冈-常绿栎类花粉代表性适中,水青冈属和禾本科花粉呈低代表性。4) DCA 表明,通过孢粉样品百分含量能较好区分沼泽、水马桑灌丛、鹅耳枥灌木林和阔叶林,水马桑灌丛、鹅耳枥灌木林和杜鹃灌木林可以区分,杜鹃灌木林、亮叶水青冈林和青冈林之间较难区分。5) 可能受花粉自身产量、散播和保存能力,以及诸如地形、气温、降水、小气候、人类活动等外部环境因素的影响,表土孢粉组合呈现明显复杂性特征,部分群落优势种花粉指示性较弱。6) 植物多样性指数和外来超代表性花粉对群落优势种花粉含量也有较强干扰作用,亮叶水青冈在其纯林中花粉含量可达 40%,共优势群落中其他优势种花粉代表性也能较大影响其花粉含量。7) 由于青冈属和常绿栎类花粉形态结构十分相似,差别微小,鉴定区分很困难,亚热带地区孢粉鉴定时宜将青冈属与常绿栎类花粉归并为青冈-常绿栎类花粉进行统计。

参考文献 (References):

- [1] Sun Y H, Xu Q H, Zhang S R, Li Y C, Li M Y, Li Y W, Wang T, Zhang X G, Wang Y X, Huang R, Hao J, Zheng Z, Zhou Z Z. A novel procedure for quantitative regional paleoclimatic reconstruction using surface pollen assemblages. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 240: 106385.
- [2] He X L, Liu D X, Pan Y F, He X, Zhang M M, Yang S X. Distribution and sources of fluvial pollen in the middle reaches of the Yellow River in China and their relationship with vegetation and land use. *Science of the Total Environment*, 2023, 856: 159109.
- [3] 孔昭宸, 张芸, 王力, 段晓红, 李玉梅. 中国孢粉学的过去、现在及未来——侧重第四纪孢粉学. *科学通报*, 2018, 63(2): 164-171.
- [4] Cruz-Silva E, Harrison S P, Marinova E, Prentice I C. A new method based on surface-sample pollen data for reconstructing palaeovegetation patterns. *Journal of Biogeography*, 2022, 49(7): 1381-1396.
- [5] Trachsel M, Dawson A, Paciorek C J, Williams J W, McLachlan J S, Cogbill C V, Foster D R, Goring S J, Jackson S T, Oswald W W, Shuman B N. Comparison of settlement-era vegetation reconstructions for STEPPS and REVEALS pollen-vegetation models in the northeastern United States. *Quaternary Research*, 2020, 95: 23-42.
- [6] Vignola C, Hättestrand M, Bonnier A, Finné M, Izdebski A, Katrantsiotis C, Kouli K, Liakopoulos G C, Norström E, Papadaki M, Strandberg N A, Weiberg E, Masi A. Mid-late Holocene vegetation history of the Argive Plain (Peloponnese, Greece) as inferred from a pollen record from ancient Lake Lerna. *PLoS One*, 2022, 17(7): e0271548.
- [7] Han D X, Gao C Y, Li Y H, Liu H X, Cong J X, Yu X F, Wang G P. Potential in paleoclimate reconstruction of modern pollen assemblages from natural and human-induced vegetation along the Heilongjiang River basin, NE China. *Science of the Total Environment*, 2020, 745: 141121.
- [8] Stebich M, Rehfeld K, Schlütz F, Tarasov P E, Liu J Q, Mingram J. Holocene vegetation and climate dynamics of NE China based on the pollen record from Sihailongwan Maar Lake. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 124: 275-289.
- [9] Yong Z J, Wang W, Chen D X, Liu L N, Ma Y Z, He J. Pollen reconstructed Holocene vegetation response to climate change and human activity in a semi-arid mountain area of North China. *Catena*, 2020, 195: 104878.
- [10] Zhang N, Ge Y W, Li Y C, Li B, Zhang R C, Zhang Z, Fan B S, Zhang W S, Ding G Q. Modern pollen-vegetation relationships in the Taihang Mountains: towards the quantitative reconstruction of land-cover changes in the North China Plain. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107928.
- [11] Guo C, Ma Y Z, Li D D, Pei Q M. Modern pollen and its relationship with vegetation and climate in the mu us desert and surrounding area, Northern China: implications of palaeoclimatic and palaeoecological reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 547: 109699.
- [12] 张芸, 陈立欣, 西瑶瑶, 孔昭宸, 乔鲜果. 中国新疆南部地区表土孢粉与现代植被. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54(2): 529-549.
- [13] Shen C M, Liu K B, Tang L Y, Overpeck J T. Modern pollen rain in the Tibetan Plateau. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 732441.
- [14] Liu L N, Wang N N, Zhang Y R, Yu X S, Cao X Y. Performance of vegetation cover reconstructions using lake and soil pollen samples from the Tibetan Plateau. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2023, 32(2): 157-169.
- [15] 李永飞, 李蓓蓓, 许斌, 刘水良, 凌超豪, 许建, 肖冰果, 董坚峰. 四川螺髻山表土和化石孢粉揭示的环境生态意义. *生态学报*, 2021, 41(8): 3153-3169.
- [16] Yao F L, Ma C M, Zhu C, Li J Y, Chen G, Tang L Y, Huang M, Jia T J, Xu J J. Holocene climate change in the western part of Taihu Lake region, East China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 485: 963-973.
- [17] 郝秀东, 欧阳绪红, 郑丽波, 钟华, 汪美芳. 浙江嵊州西白山表土花粉的初步研究. *地理科学*, 2020, 40(6): 1010-1018.
- [18] 李圆圆, 马春梅, 方伊曼, 崔安宁. 江西南昌西山地区表土孢粉与植被关系研究. *微体古生物学报*, 2016, 33(2): 138-151.
- [19] 庞有智, 杨明生, 张虎才, 邓财, 唐领余. 鄱阳湖地区过去 2160 年孢粉记录的植被变化及影响因素. *第四纪研究*, 2023, 43(5): 1225-1240.
- [20] 全晓文, 黄康有, 水坤春, 李宏卫, 谢德豪, 左锦堂, 岑彩凤, 郑卓. 华南亚热带中部山地垂直植被带表土孢粉散布规律与气候相关性. *热带地理*, 2022, 42(10): 1597-1608.
- [21] Rahman A, Luo C X, Chen B S, Haberle S, Khan M H R, Jiang W M, Xiang R, Liu J G, Wang L S, Lin G, Yang M X, Thilakanayaka V. Regional and seasonal variation of airborne pollen and spores among the cities of South China. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(4): 283-295.

- [22] 倪健, 陈瑜, Ulrike H, 董丹. 中国第四纪晚期孢粉记录整理. 植物生态学报, 2010, 34(8): 1000-1005.
- [23] 安晓娟, 李萍, 戴伟, 尹其悦, 王丹, 莫莉. 亚热带几种林分类型土壤有机碳变化特征及与土壤性质的关系. 中国农学通报, 2012, 28(22): 53-58.
- [24] 卢志军. 湖南八大公山国家级自然保护区简介. 生物多样性, 2011, 19(2): 271.
- [25] 杨道德, 彭英, 喻勋林, 胡绵蛟. 湖南八大公山国家级自然保护区生物多样性研究与保护. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2016.
- [26] 祁承经, 喻勋林, 曹铁如, 周建仁. 湖南八大公山的植物区系及其在植物地理学上的意义. 云南植物研究, 1994, 16(4): 321-332.
- [27] 曹铁如, 祁承经, 喻勋林. 湖南八大公山亮叶水青冈群落物种多样性的研究. 生物多样性, 1997, 5(2): 112-120.
- [28] 杨一光. 湖南省八大公山自然保护区的珍稀植物及其群落特征. 湖南师范大学自然科学学报, 1986, (2): 83-90.
- [29] Faegri K, Kaland P E, Krzywinski K. A Textbook of pollen analysis. John Wiley & Sons, Chichester. 1989, 1-328.
- [30] 中国科学院植物研究所古植物室孢粉组; 中国科学院华南植物研究所形态研究室. 中国热带亚热带被子植物花粉形态. 北京: 科学出版社, 1982.
- [31] 王伏雄, 钱南芬, 张玉龙, 杨慧秋. 中国植物花粉形态. 2 版. 北京: 科学出版社, 1995.
- [32] 唐领余. 中国第四纪孢粉图鉴. 北京: 科学出版社, 2016.
- [33] Grimm E C. TILIA and TILIA GRAPH: PC spreadsheet and graphics software for pollen data. INQUA Working group on data-Handling Methods Newsletter, 1990, 4: 5-7.
- [34] Braak C, Šmilauer P. CANOCO 4.5 reference manual and CanoDraw for windows user's guide: software for canonical community ordination. Microcomputer Power (Ithaca, N. Y., USA), 2002, 1-500.
- [35] 汤庚国, 向其柏. 樟科植物花粉形态研究. 植物分类学报, 1995, 33(2): 161.
- [36] 代然然, 韩晓丽, 张德怀. 重庆缙云山自然保护区表土花粉组合特征的初步研究. 西南大学学报: 自然科学版, 2014, 36(5): 159-165.
- [37] 周凌瑜, 刘群录, 邵邻相. 虫媒花与风媒花花粉形态的比较. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2008, 26(3): 177-182.
- [38] 李宜垠, 张新时, 周广胜. 中国东北样带 (NECT) 东部森林区的植被与表土花粉的定量关系. Acta Botanica Sinica, 2000, 42(1): 81-88.
- [39] 王秀梅, 程波, 万金红. 宜昌大老岭表土孢粉组合与植被及环境因子的关系分析. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2023, 57(3): 412-422.
- [40] 狄维忠, 郑宏春. 国家重点保护植物——白辛树. 西北大学学报(自然科学版), 1989, 19(3): 29.
- [41] 李晶, 周天阳, 鲁雪丽, 李新涛, 孙斌, 孟红杰. 珍稀植物连香树在中国分布区北缘的种子性状及幼苗更新限制. 生物多样性, 2020, 28(10): 1161-1173.
- [42] 李永飞, 夏中林, 沈华东, 许斌, 陈发军, 凌超豪. 峨眉山世界遗产地表土孢粉组合及其生态和古环境启示. 生态学报, 2020, 40(1): 181-201.
- [43] 夏洁, 倪健. 中国花粉 R 值特征. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(1): 309-322.
- [44] 刘会平, 唐晓春, 王开发, 潘安定. 神农架北坡表土常见花粉的 R 值研究. 地理科学, 2001, 21(4): 378-380.
- [45] 谭斌, 徐德宇, 张芸, 孔昭宸, 倪健. 样地尺度现代表土花粉与植物群落的定量关系. 应用生态学报, 2021, 32(2): 441-452.
- [46] 李文漪, 姚祖驹. 表土中松属花粉与植物间数量关系的研究. 植物学报: 英文版, 1990, 32(12): 943.
- [47] Deng M, Jiang X L, Hipp A L, Manos P S, Hahn M. Phylogeny and biogeography of East Asian evergreen oaks (*Quercus* Section *Cyclobalanopsis*; *Fagaceae*): insights into the Cenozoic history of evergreen broad-leaved forests in subtropical Asia. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2018, 119: 170-181.
- [48] 唐领余, 李春海, 张小平, 邵剑文, 周忠泽, 凌超豪. 第四纪地层中壳斗科植物花粉化石及其与气候地理条件的关系. 古生物学报, 2018, 57(3): 387-410.
- [49] 葛井莲, 舒军武, 毛礼米. 南京紫金山山麓湖泊表层沉积物的孢粉分析. 古生物学报, 2021, 60(3): 455-470.
- [50] 李永飞, 贺杰, 李春海, 许斌, 谢贤健. 云南丽江老君山表土花粉与植被关系的研究. 微体古生物学报, 2018, 35(1): 51-64.
- [51] 柯端, 肖霞云, 贾宝岩, 迟长婷. 川西南伍须海及周边山地现代孢粉分布与植被、气候关系研究. 第四纪研究, 2024, 44(3): 671-687.
- [52] 龙香月, 黄康有, 陈聪, 谢德豪, 水坤春, 李宏卫, 郑卓. 华南亚热带武夷山地区垂直植被带表土孢粉散布规律. 热带地理, 2023, 43(6): 1005-1020.
- [53] 李文漪, 姚祖驹. 中国北、中亚热带晚第四纪植被与环境研究. 北京: 海洋出版社. 1993, 1-152.
- [54] 萧家仪, 商志远, 舒强, 尹建吉, 吴小爽. 中国南方内陆山地末次冰盛期植被特征及古环境意义. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(5): 651-660.
- [55] 舒军武. 日本本州北部白神山地圆齿水青冈 (*Fagus crenata*) 表土花粉分析及水青冈属花粉的代表性. 微体古生物学报, 2012, 29(3): 213-225.
- [56] 童国榜, 羊向东, 王苏民, 夏良华. 满洲里—大杨树一带表土孢粉的散布规律及数量特征. Acta Botanica Sinica, 1996, 38(10): 814-821.
- [57] 张华, 肖霞云, 羊向东, 隆浩. 云南泸沽湖及周边山地表层孢粉与植被关系研究. 微体古生物学报, 2016, 33(3): 304-315.
- [58] 汪敏容, 蒋勇军, 郝秀东, 马丽娜, 张彩云, 秦琳娟, 郑暘, 邱华. 重庆中梁山岩溶槽谷区表土孢粉与现代植被的关系研究. 中国岩溶, 2021, 40(3): 466-475.
- [59] 陈昌笃, 李迪华. 湖南省武陵源地区的生物多样性和生态完整性. 生态学报, 2003, 23(11): 2414-2423.
- [60] 姚良锦, 姚兰, 易咏梅, 艾训儒, 冯广, 刘峻城, 陈斯, 黄伟, 丁易, 臧润国. 亚热带常绿阔叶混交林优势种川陕鹅耳枥和多脉青冈的空间格局. 林业科学, 2018, 54(12): 1-11.
- [61] 于明坚. 青冈常绿阔叶林群落动态研究. 林业科学, 1999, 35(6): 42-51.
- [62] 黄孔泽, 喻勋林, 曹铁如. 湖南城步金童山亮叶水青冈群落研究. 湖南林业科技, 2007, 34(2): 1-5.
- [63] 杨波, 曹晓栋, 程洁婕, 余登利, 李光荣, 魏鲁明, 白新祥. 贵州省宽洞水国家级自然保护区亮叶水青冈群落结构及多样性. 生态学报, 2022, 42(7): 2685-2697.